

Izbor materijala za okvir invalidskih kolica

Kolar, Ana Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:655315>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ana Marija Kolar

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Ana Marija Kolar

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede i asistentici Heleni Lukšić na stručnom vodstvu, strpljenju, savjetima i uloženom vremenu.

Također, posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci i u dobrim i u teškim trenucima tijekom studija.

Ana Marija Kolar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Studentica: **Ana Marija Kolar**

JMBAG: 0035212307

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor materijala za okvir invalidskih kolica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Material selection for the wheelchair frame**

Opis zadatka:

Izbor odgovarajućeg materijala važna je zadaća pri realizaciji svake konstrukcijske ideje pri čemu treba uzeti u obzir različite kriterije i zahtjeve funkcije, mogućnosti proizvodnje i uvjete primjene kao i zahtjeve tržišta. Tijekom razvoja bilo kojeg proizvoda, uz izbor optimalnog materijala, vrlo važnu ulogu u cjelokupnom procesu imaju konstrukcijsko oblikovanje i izbor proizvodnog postupka. Ove tri aktivnosti su međusobno isprepletene i utječu jedna na drugu. Sve veći broj različitih materijala i proizvodnih postupaka čine postupak konstruiranja složenijim i zahtjevnijim.

U diplomskom radu potrebno je izabrati optimalni materijal za okvir invalidskih kolica. Potrebno je analizirati funkciju, konstrukcijske i ostale zahtjeve koji se postavljaju na okvir invalidskih kolica te izdvojiti pripadajuće zahtjeve i kriterije vrednovanja materijala. S obzirom na osnovnu zadaću okvira te veličinu i vrstu opterećenja tijekom uporabe, provesti proračun okvira. Izabrane i rangirane kriterije preslikati u svojstva potrebna za usporedbu te provesti predizbor i konačni izbor optimalnog materijala za okvir invalidskih kolica.

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

Zadatak zadan:

19. siječnja 2023.

Datum predaje rada:

23. ožujka 2023.

Predviđeni datumi obrane:

27.- 31. ožujka 2023.

Zadatak zadala:

prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. MODELIRANJE OKVIRA INVALIDSKIH KOLICA.....	9
2.6.1. Dimenzije okvira invalidskih kolica	20
2.6.2. Oblik profila okvira invalidskih kolica	21
2.6.3. Naprezanje osovine	21
2.6.4. Zlatni rez	23
2.6.5. Kut naslona	24
2.6.6. Smična naprezanja	24
3. IZBOR MATERIJALA	26
3.3.1. Dovoljna čvrstoća materijala da može izdržati zadano opterećenje	30
3.3.2. Zadovoljavajuća krutost.....	31
3.3.3. Otpornost na krhki lom odnosno što veća lomna žilavost	33
3.3.4. Što manja gustoća	35
3.3.5. Što bolja otpornost na atmosfersku koroziju i sredstva za čišćenje	35
3.3.6. Tehnogičnost - mogućnost spajanja i oblikovljivost	36
3.3.7. Što niža cijena materijala	37
3.3.8. Taktilnost	40
3.3.9. Mogućnost recikliranja	40
3.4. Izračunavanje faktora važnosti.....	40
3.5.1. Karte svojstava materijala.....	43
3.5.1.1. Naprezanje unutar provrta na „X“ dijelu okvira	45
3.5.1.2. Materijali za okvire invalidskih kolica	49

3.5.2. Metoda utjecajnosti svojstava	50
4. ANALIZA OPTEREĆENJA INVALIDSKIH KOLICA	53
5. ZAKLJUČAK	58
6. LITERATURA	60

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prva samohodna invalidska kolica [3].....	3
Slika 2.	„Bath“ invalidska kolica iz 1783. godine [3]	3
Slika 3.	„Bath“ verzija invalidskih kolica izrađena za kraljicu Viktoriju [3].....	4
Slika 4.	Podjela elektromotornih invalidskih kolica prema položaju pogonskih kotača [5]	5
Slika 5.	Sklopivi okvir (lijevo) [6] i čvrsti okvir (desno) [7]	6
Slika 6.	Invalidska kolica za kućnu primjenu [8]	7
Slika 7.	Aktivna invalidska kolica [8]	7
Slika 8.	Invalidska kolica za igranje košarke [9].....	8
Slika 9.	Ručna invalidska kolica <i>Motus VR</i> [12].....	12
Slika 10.	Ručna invalidska kolica <i>Avantgarde</i> [13]	13
Slika 11.	Ručna invalidska kolica <i>Ventus</i> [14]	13
Slika 12.	Bočna stabilnost sa ukošenim kotačima s obzirom na ukošeni teren [16]	17
Slika 13.	Prostor potreban za kretanje osoba u invalidskim kolicima [17]	18
Slika 14.	Puna osovina (lijevo) i šuplja osovina (desno) s pripadajućim dimenzijama	22
Slika 15.	Zlatni rez okvira invalidskih kolica.....	23
Slika 16.	Vijak na „X“ dijelu invalidskih kolica, opterećen na smicanje [21]	24
Slika 17.	Izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda [22]	26
Slika 18.	Povezanost konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupaka proizvodnje [23]	27
Slika 19.	Dijagram toka izbora materijala [24]	28
Slika 20.	Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke skupine metalnih materijala [27]	35
Slika 21.	Devet skupina postupaka proizvodnje [22]	37
Slika 22.	Usporedba nekih tehničkih materijala na temelju cijene po jedinici mase [26]....	39
Slika 23.	Shema opterećenja invalidskih kolica [21]	43
Slika 24.	Opterećenje invalidskih kolica prilikom kretanja neravnim terenom [21].....	45
Slika 25.	Izračun sile iz simetrije invalidskih kolica	46
Slika 26.	Prikaz opterećenja „X“ dijela okvira invalidskih kolica [21].....	46
Slika 27.	Prikaz opterećenja na jednoj nozi „X“ dijela okvira invalidskih kolica [21].....	47
Slika 28.	Dijagram čvrstoća-gustoća s ucrtanom linijom pokazatelja [30].....	48
Slika 29.	Model okvira invalidskih kolica za numeričku analizu.....	53
Slika 30.	Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta postavljenih na okvir invalidskih kolica.....	55

Slika 31.	Tetraedarski konačni element drugog reda, C3D10	55
Slika 32.	Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema <i>von Misesu</i> u MPa	56
Slika 33.	Raspodjela ekvivalentnih naprezanja prema <i>von Misesu</i> u MPa	56

POPIS TABLICA

Tablica 1	Prikaz vrsta oštećenja koje uzrokuju invaliditet prema spolu i dobi [10]	10
Tablica 2.	Prikaz prema oštećenjima funkcionalnih sposobnosti [10]	11
Tablica 3.	Intervju s korisnikom ručnih sklopivih invalidskih kolica	15
Tablica 4	Invalidska kolica razvrstana prema težini, materijalu i sklopivom dizajnu [19]... ..	20
Tablica 5.	Dimenzije invalidskih kolica i modela okvira invalidskih kolica	21
Tablica 6.	Zahtjevi na okvir invalidskih kolica	29
Tablica 7.	Svojstva i karakteristike materijala	30
Tablica 8.	Prosječne vrijednosti modula elastičnosti i specifične krutosti različitih materijala [26]	32
Tablica 9.	Digitalno-logička metoda za okvir invalidskih kolica	42
Tablica 10.	Predizbor materijala za okvir invalidskih kolica [34] [35] [36]	51
Tablica 11.	Skalirane vrijednosti	51
Tablica 12.	Mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-7075-T6	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	m	duljina ureza (veličina pogreške) u materijalu
B_i		faktor važnosti za svojstvo
C_2		konstanta koja ovisi o karakteristikama opterećenja
D	m	promjer vijka
d	m	vanjski promjer šuplje osovine
d_i	m	promjer pune osovine
d_o	m	unutarnji promjer šuplje osovine
E	GPa	Youngov modul
F_b	N	sila opterećenja na provrt „X“ mehanizma
F_f	N	maksimalna dopuštena sila
F_o	N	težina osobe
F_1	N	sila na stražnjem lijevom većem kotaču
F_2	N	sila na prednjem manjem kotaču
F_3	N	sila na stražnjem desnom većem kotaču
f		omjer radnog naprezanja i granice razvlačenja
G	GPa	modul smicanja
I	m ⁴	moment inercije
K_{IC}	MPa√m	lomna žilavost
L	m	razmak oslonaca grede
L_1	m	krak sile F3 s obzirom na provrt „X“ mehanizma
l	m	duljina osovine
M_p		pokazatelj vrednovanja materijala
M_X	Nm	momentno opterećenje provrta „X“ mehanizma
m	kg	masa
O_s		faktor oblika presjeka pri opterećenju na savijanja
R_e	GPa	granica tečenja
R_f	GPa	granica tečenja za metale i polimere, vlačna čvrstoća za keramiku, staklo i krhke polimere
R_v	m	polumjer provrta „X“ mehanizma
$R_{0,2}$	GPa	konvencionalna granica tečenja
S		faktor sigurnosti
t	m	širina kontaktne površine između vijka i provrta „X“ mehanizma
W	m ³	moment otpora
α		korekcijski faktor za geometriju i položaj pukotine
ρ	kg/m ³	gustoća

σ_{dop}	GPa	dopušteno naprezanje
σ_{ekv}	GPa	ekvivalentno naprezanje
σ_{max}	GPa	maksimalno naprezanje
τ	GPa	smično naprezanje
ν		Poissonov omjer

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
CM	cijena materijala
BCI	brain-computer interface
ONK	otpornost na koroziju
TAK	taktilnost
TEH	tehnologičnost

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je izabrati optimalan materijal za okvir invalidskih kolica. Na samom početku rada opisana je funkcija invalidskih kolica. Prema izabranoj grupi korisnika dobivene su potrebe odnosno zahtjevi na okvir invalidskih kolica. Analizom zahtjeva izdvojeni su konstrukcijski zahtjevi pomoću kojih je napravljen model invalidskih kolica. Na modelu je proveden proračun na najkritičnijem mjestu okvira invalidskih kolica. Prema rezultatima proračuna napravljen je predizbor materijala kako bi se suzilo područje izbora optimalnog materijala.

Zahtjevi na okvir invalidskih kolica, dobiveni od korisnika, preslikani su u svojstva materijala. Digitalno-logičkom metodom izračunat je faktor važnosti za svako svojstvo. Metodom utjecajnosti svojstava izabran je polimerni kompozit s ugljičnim vlaknima kao optimalan materijal za okvir invalidskih kolica. Bez obzira na rezultate dobivene provedenim metodama, zbog visoke cijene kompozitnog materijala, kao materijal okvira invalidskih kolica za ciljanu dobnu skupinu izabrana je aluminijska legura. Aluminijske legure pokazale su se kao materijal koji pruža balans između kvalitete i cijene što su bili najbitniji traženi faktori kod razmatranja. Kako bi se potvrdilo da izabrani materijal i napravljeni model za ciljanu grupnu skupinu može izdržati zadano opterećenje, provedena je numerička analiza. Utvrđeno je da dobiveno maksimalno naprezanje ne prelazi vrijednost dopuštenog naprezanja, s dovoljnom sigurnošću.

Ključne riječi: izbor materijala, okvir invalidskih kolica, numerička analiza

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to choose the optimal material for the wheelchair frame. In the introductory part of the work, the function of the wheelchair is described. According to the selected group of users, the needs and requirements for the wheelchair frame were obtained. The requirements analysis identified the structural requirements that were used to create the wheelchair model. On the most critical point of the wheelchair was made an analytical calculation. According to the calculation results, a pre-selection of materials was made to narrow down the area of the optimal material selection.

The requirements on the wheelchair frame, obtained from the user, are mapped to the material properties. The factor of importance for each property was calculated using the digital-logic method. Polymer composite with carbon fibers was chosen as the optimal material for the wheelchair frame using the method of properties influence. Regardless of the results obtained by the implemented methods, due to the high cost of the composite material, aluminum alloy was chosen as the wheelchair frame material for the selected age group. Aluminum alloys proved to be a material that provides a balance between quality and price, which were the most important required factors when considering.

To confirm that the selected material and the model made for the target group can withstand the given load, a numerical analysis was carried out. It was determined that the obtained maximum stress does not exceed the value of the permissible stress, with sufficient safety.

Key words: material selection, wheelchair frame, numerical analysis

1. UVOD

1.1. Invaliditet

Riječ invaliditet dolazi od latinskog naziva *invalidus* što u prijevodu znači nemoćan, nevrijedan, nesposoban, slab, a prema tome jasno je kako se na osobe s invaliditetom gleda kao na manje vrijedne u odnosu na druge, s velikim naglaskom na njihova oštećenja. Nažalost, sav fokus jest na njihovim nedostacima i oštećenjima, umjesto na samoj osobi. Postoje razne definicije iz različitih dokumenata za pojam invaliditet pa se tako, na temelju članka 2. Zakona o hrvatskom registru osoba s invaliditetom, invaliditet definira kao „trajno ograničenje, smanjenje ili gubitak sposobnosti fizičke aktivnosti ili psihičke funkcije primjerene životnoj dobi osobe i odnosi se na sposobnosti, u obliku složenih aktivnosti i ponašanja, koje su općenito prihvaćene kao bitne sastavnice svakodnevnog života“ (Hrvatski zavod za javno zdravstvo, 2018.) [1].

Najprihvatljiviji i najčešći naziv koji se koristi za ovu populaciju jest osobe s invaliditetom, čime se naglašava kako ta osoba nije u potpunosti invalidna već samo jedan njen dio tijela nema funkciju kakvu imaju zdrave osobe. Zakon o profesionalnoj rehabilitaciji i zapošljavanju osoba s invaliditetom ima sljedeću definiciju za osobe s invaliditetom; „Osoba s invaliditetom je osoba koja ima dugotrajna tjelesna, mentalna, intelektualna ili osjetilna oštećenja koja u međudjelovanju s različitim preprekama mogu sprječavati njezino puno i učinkovito sudjelovanje u društvu na ravnopravnoj osnovi s drugima“ (Zakon o profesionalnoj rehabilitaciji i zapošljavanju osoba s invaliditetom, NN br. 157/13, 152/14, 39/18). Odnos okoline prema osobama s invaliditetom mijenjao se s vremenom na bolje sve do danas kada sve više poslodavaca nastoji pronaći radno mjesto za njih na način da im se pruže rehabilitacija, prekvalifikacija i obrazovanje, imajući na umu težinu njihove invalidnosti. Osim toga sve više se razvijaju i razna pomagala kojima im se nastoji omogućiti normalan život i samostalno obavljanje svakodnevnih radnji. Nažalost, sva ta poboljšanja su ipak još uvijek ostala u okviru ispunjavanja zakonskih formi, stoga potrebno je još puno raditi na tome da se osobe s invaliditetom prihvati kao osobe koje su vrijedne te koje, uz minimalna ulaganja u njih, imaju sposobnost razvijati se te raditi kao i zdrave osobe [1]. Invalidnost se dijeli u 4 kategorije: tjelesna, senzorna, mentalna i kombinirana, gdje tjelesna invalidnost podrazumijeva ozljede i bolesti mišićno-koštanog i živčanog sustava, senzorna podrazumijeva oštećenja i smetnje sluha, vida i govora te mentalna razna psihičke poteškoće [1].

1.2. Invalidska kolica

Osobna mobilnost znači sloboda za osobe s tjelesnim poteškoćama. Jedan od najboljih izuma u području medicine koji je pomogao osobama s invaliditetom donjih udova te većini starije populacije jesu invalidska kolica. Činjenica da te osobe više ne ovise u potpunosti o pomoći druge osobe za obavljanje svakodnevnih radnji je za njih veliki korak naprijed [2].

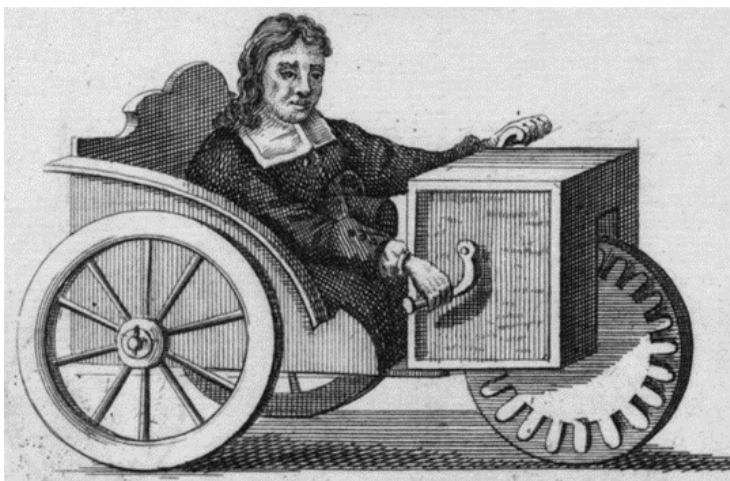
Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije iz 2017. godine u svijetu je bilo 75 milijuna korisnika invalidskih kolica, što je zapravo oko 1 % ukupne populacije. Glavni najčešći uzroci nepokretljivosti mogu biti urođena stanja, bolest, ozljede te starost [2].

Danas postoji široki spektar ponude invalidskih kolica, a izbor pojedinog tipa uvelike ovisi o osobnim potrebama. U osnovi se invalidska kolica dijele na invalidska kolica s električnim pogonom i invalidska kolica s ručnim upravljanjem, a svaka imaju neke prednosti i ograničenja kod obavljanja raznih aktivnosti, kretanja, prijevoza, pristupa zgradama i tako dalje. Još ranih 2000-ih pojavili su se razni dodaci na ručno upravljanim invalidskim kolicima kojima se olakšava njihovo pokretanje i korištenje. Na taj način ručna invalidska kolica dobila su druge nove mogućnosti kao primjerice pokretanje pomoću električne struje ili omogućavanje invalidskim kolicima da se kreću neravnim terenima. Svi ti dodaci mijenjaju uvjete opterećenja na okviru invalidskih kolica što može povećati rizik od kvarova dijelova te time utjecati i na životni vijek invalidskih kolica. Stavljanjem svih tih dodataka na invalidska kolica, zbog smanjene stabilnosti povećava se rizik od ozljeda usred padova i kvarova komponenti čime se povećavaju troškovi održavanja. Prije će doći do promjena u zakretnom momentu i momentima savijanja ako se kolica guraju ili ih vuče neki pomoćni uređaj, nego kada ih pokreće korisnik svojom snagom. Tako postoje razni dokazi o plastičnoj deformaciji te lomu u blizini zavarenih dijelova na području ploče za držanje nogu u obliku slova D, kada se na njih ugrade dodaci za mobilnost [2].

1.3. Povijest invalidskih kolica

Nije sigurno kada su se točno pojavili početni oblici invalidskih kolica, no postoje drevni natpisi iz stare Kine i Grčke kako su se proizvodi nalik na invalidska kolica pojavili otprilike negdje oko šestog stoljeća. Jedan od najboljih dokumentiranih primjeraka invalidskih kolica jest iz 1595. godine, napravljenih za španjolskog kralja. Poznato je kako se radi o stolcu s naslonima za ruke i noge te četiri mala kotačića koji se gurao uz pomoć neke druge osobe. Prva samohodna

invalidska kolica, prikazana na slici 1, pojavila su se 1655. godine u Njemačkoj, a izumio ih je Farfler kao vlastito pomagalo za kretanje. Ova invalidska kolica kretala su se pomoću tri kotača, a sustav za pokretanje sastojao se od ručice i zupčanika pričvršćenih na prednji kotač [3].



Slika 1. Prva samohodna invalidska kolica [3]

Na slici 2 prikazana su invalidska kolica iz 1783. godine sastavljena od dva kotača spojena osovinom ispod sjedala ispletenog od pruća i s malim zakretnim kotačićem ispred oslonca za noge. Korisnik je upravljao ovim kolicima pomoću dugačke zakrivljene šipke spojene na prednji kotač [3].



Slika 2. „Bath“ invalidska kolica iz 1783. godine [3]

Varijacije „Bath“ invalidskih kolica brzo su postale vrlo popularne pa je tako primjerak prikazan na slici 3, izrađen za kraljicu Viktoriju 1893. godine u vrijeme njezine slabije pokretljivosti [3].



Slika 3. „Bath“ verzija invalidskih kolica izrađena za kraljicu Viktoriju [3]

Početkom 20. stoljeća u Indiji su se izrađivala invalidska kolica sa četiri kotača čija je konstrukcija napravljena od trstike što je utjecalo na njenu malu masu. Nedugo nakon toga napravljena su kolica za američkog predsjednika T. Roosevelta također sa 4 kotača uz dodatak učvršćenja za noge koji je omogućavao stajanje. Od 1930-ih razvoj konstrukcija invalidskih kolica kreće se naprijed velikom brzinom, kada se u izradi počinju koristiti materijali poput aluminija i titanija umjesto starijih inačica čelika. Primjenom metalnih materijala niže gustoće invalidska kolica postaju puno lakša u odnosu na starije modele. Veliku ulogu u tom razvoju i pokretanju tehnološke prilagodbe imala je pojava sportskih modela prilagođenih raznim sportovima.

Danas postoji uređaj naziva „BrainGate“ koji se ugrađuje u korisnikov mozak i spaja na računalo na koje korisnik može slati mentalne naredbe s ciljem da bilo koji stroj, uključujući invalidska kolica, radi ono što on žele. Nova tehnologija nazvana je sučelje mozak-računalo (brain-computer interface- BCI) [3].

Danas su invalidska kolica jedno od najčešćih korištenih pomagala za poboljšanje osobne mobilnosti osoba s invaliditetom. Svjetska zdravstvena organizacija invalidska kolica smatra

temeljnim ljudskim pravom za osobe s ograničenom pokretljivošću koja omogućuju neovisnost te normalno sudjelovanje u svim aspektima života [3].

1.4. Kategorizacija invalidskih kolica

Kao što je već rečeno osnovna podjela invalidskih kolica jest na invalidska kolica s električnim pogon i invalidska kolica s ručnim upravljanjem, a osnovna razlika je u tome što se električna invalidska kolica pokreću pomoću elektromotora, dok ručna pokreće snaga korisnika ili neke druge osobe [2].

Elektromotorna invalidska kolica namijenjena su osobama koje imaju poteškoće s pokretanjem ručnih invalidskih kolica zbog boli, nedovoljne snage ruku te onima koji su izloženi riziku od prevelikog umora. Najveća prednost ovih invalidskih kolica je samostalan odlazak do cilja bez velikog naprezanja i umora korisnika. Jednakim naporom ovakva kolica kretajući se jednakim naporom uzbrdicom te po ravnom i neravnom terenu. Kako bi se pokrenula ova vrsta kolica potrebno je koristiti samo jednu ruku što znači da druga može poslužiti za držanje nekih osobnih stvari. Jedan od nedostataka jest ograničena udaljenost koja se može proći jer ona zavisi o trajanju baterije ugrađena u kolicima. Osim toga, zbog dodatka poput elektromotora takva kolica imaju puno veću masu u odnosu na ručna invalidska kolica. Dodaci također otežavaju sklapanje i transport invalidskih kolica [4].

Na slici 4 prikazana su elektromotorna invalidska kolica s različitim položajem pogonskih kotača.

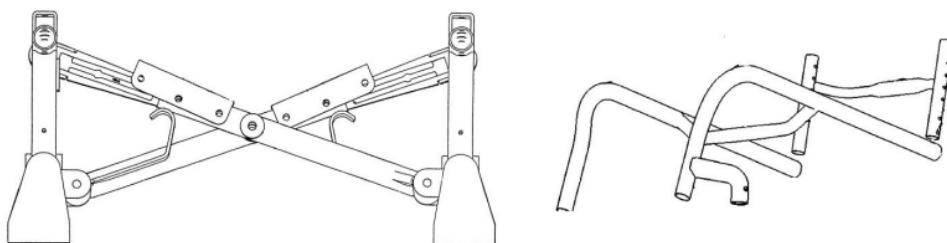


Slika 4. Podjela elektromotornih invalidskih kolica prema položaju pogonskih kotača [5]

Elektromotorna invalidska kolica se dijele s obzirom na položaj pogonskih kotača pa tako postoje kolica s prednjim, stražnjim i središnjim položajem pogonskih kotača. Invalidska kolica sa središnjem položajem pogonskih kotača omogućuju najveću agilnost, ali time traže i najveću spretnost kod upravljanja [2].

Bez obzira na sve prednosti koje imaju elektromotorna invalidska kolica, danas se još uvijek najviše koriste ručno pokretana kolica. Ručna invalidska kolica jednostavnija su za održavanje, transport i sklapanje, proizvode puno manje buke, okretnija su i kod njih duljina prijeđenog puta nije ovisna o baterijskom punjenju. Ova kolica su puno lakša te je time potrebno manje energije i snage korisnika ili neke druge osobe za njihovo upravljanje. Ručna invalidska kolica se dijele na sklopiva i čvrsta, a njihova osnovna razlika je u tome što se kod čvrstog zavarenog okvira transport omogućuje sklapanjem naslona za leđa dok kod sklopivog okvira transport odnosno sklapanje omogućava „X“ mehanizam. Na slici 5 prikazana su oba tipa okvira.

Postoje razne izvedbe ručnih invalidskih kolica, a jedna od najpoznatijih su ona za upotrebu u zdravstvenim ustanovama koja su konstruirana na način da se jednim kolicima može koristiti širok spektar ljudi. Ona su vrlo jednostavna, bez posebnih dodataka, lako pokretna i jednostavna za održavanje [2].



Slika 5. Sklopivi okvir (lijevo) [6] i čvrsti okvir (desno) [7]

Postoji izvedba ručnih invalidskih kolica koja je namijenjena samo za korištenje u zatvorenim prostorima. S obzirom da unutarnji prostori raznim sadržajima ograničavaju slobodnije kretanje kolicima, takva kolica, kao što je vidljivo na slici 6, imaju smanjeni međuosovinski razmak i male kotače na stražnjoj strani. Time se smanjuje mogućnost zapinjanja velikih kotača u okolne sadržaje, a pomoću malih kotačića povećava se pokretljivost koji opet, gledajući kolica s bočne strane, smanjuju stabilnost samih kolica.



Slika 6. Invalidska kolica za kućnu primjenu [8]

Postoje i takozvana aktivna invalidska kolica, prikazana na slici 7, koja se razlikuju od ostalih što se izrađuju individualno prema fizičkim i psihičkim karakteristikama pojedinca s ciljem kako bi ih korisnik mogao koristiti za zabavu i razne avanture. Radi se o čvrstoj konstrukciji koja osigurava okretnost i stabilnost, a istovremeno zbog izrade od materijala poput aluminija i titanija relativno su male težine [8].



Slika 7. Aktivna invalidska kolica [8]

U takva aktivna invalidska kolica spadaju i kolica za sport, pri čemu se rade različite konstrukcije prilagođene svakoj vrsti sporta. Tako postoje kolica za utrke, kolica za igranje košarke, kolica za igranje rukometa i slično, a primjer je prikazan na slici 8.



Slika 8. Invalidska kolica za igranje košarke [9]

2. MODELIRANJE OKVIRA INVALIDSKIH KOLICA

Nastanak novog proizvoda vrlo je složen, dugotrajan i financijski zahtjevan posao. Radi se o timskom radu u kojem je potrebno iskombinirati nekoliko procesa, imajući na umu da se ne izgubi ono najbitnije, a to je kvaliteta proizvoda. Konstruiranje je jedan od tih procesa u kojem se na osnovu unaprijed postavljenih zahtjeva proizvoda izvodi tehnološki izvedivo rješenje. U ovom dijelu rada kroz nekoliko koraka opisan je nastanak modela okvira invalidskih kolica koji je potreban za daljnju analizu i izbor optimalnog materijala. Pri modeliranju okvira invalidskih kolica vodilo se računa o dobnoj skupini, opterećenju te specifičnim željama i potrebama korisnika.

2.1. Odabir dobne skupine

Prema tablici 1 i tablici 2, koje su preuzete iz izvješća o osobama s invaliditetom u Republici Hrvatskoj, izabrana je dobna skupina 65+ kao korisnička skupina invalidskih kolica koja će se razmatrati u ovom radu. Ova dobna skupina izabrana je na temelju najvećeg broja osoba koje bi, prema pretpostavci, mogle biti korisnici invalidskih kolica zbog oštećenja lokomotornog sustava odnosno drugih tjelesnih oštećenja.

U tablici 1 prikazani su podaci o vrsti oštećenja koje uzrokuju invaliditet prema spolu i dobnim skupinama. Uzeta je pretpostavka kako najveći postotak korisnika invalidskih kolica ima oštećenja lokomotornog sustava. U tablici 1 vidi se kako najveći broj osoba s oštećenjem lokomotornog sustava pripada dobnoj skupini 65+ i prema potrebama te dobne skupine provedeno je modeliranje okvira invalidskih kolica.

U tablici 2 prikazani su podaci o oštećenjima funkcionalnih sposobnosti prema spolu i dobnim skupinama. Uzeta je pretpostavka kako je najveći postotak korisnika invalidskih kolica s tjelesnim oštećenjima. I ovdje se jasno vidi da najveći broj osoba s tjelesnim oštećenjima pripada dobnoj skupini 65+.

S obzirom na podatke dobivene iz tablice 1 i tablice 2, modeliranje okvira invalidskih kolica provedeno je prema potrebama dobne skupine 65+.

Tablica 1 Prikaz vrsta oštećenja koje uzrokuju invaliditet prema spolu i dobi [10]

Vrsta oštećenja	Spol	Dobna skupina		
		0-19	20-64	65+
Višestruka oštećenja	Ž	6835	31079	42741
	M	12409	45170	33086
Oštećenja lokomotornog sustava	Ž	1357	29599	47901
	M	1646	43089	42756
Oštećenja drugih organa i organskih sustava, kromosomopatije, prirođene anomalije i rijetke bolesti	Ž	3050	31655	44481
	M	4333	27716	33816
Mentalna oštećenja	Ž	2427	25425	28045
	M	5901	57992	27529
Oštećenja središnjeg živčanog sustava	Ž	5869	16835	27529
	M	8106	21775	23407
Oštećenja govorno-glasovne komunikacije	Ž	6128	4516	878
	M	12343	8120	1047
Intelektualna oštećenja	Ž	2969	8283	952
	M	4519	11310	868
Oštećenja vida	Ž	792	3248	5056
	M	971	4815	4250
Oštećenja perifernog živčanog sustava	Ž	254	3350	2796
	M	329	5946	3770
Oštećenja sluha	Ž	649	2700	3431
	M	978	4750	3861
Poremećaji iz spektra autizma	Ž	544	231	9
	M	2212	647	5
Gluhosljepoća	Ž	7	25	40
	M	4	52	45

Tablica 2. Prikaz prema oštećenjima funkcionalnih sposobnosti [10]

Vrsta oštećenja	Spol	Dobna skupina		
		0-19	20-64	65+
Psihičke bolesti	Ž	1475	22118	20526
	M	3495	48941	25544
Kronične bolesti	Ž	885	22293	24672
	M	1063	16969	19278
Tjelesno oštećenje	Ž	869	6514	9400
	M	1085	7260	5764
Intelektualne teškoće	Ž	2703	8057	924
	M	4127	11029	849
Poremećaj glasa, jezika i govora	Ž	4555	4197	488
	M	8908	7493	660
Oštećenje vida	Ž	662	2857	4676
	M	811	4323	3961
Kronične bolesti kod djece	Ž	6428	-	-
	M	7835	-	-
Višestruke teškoće	Ž	2426	2580	49
	M	4112	4283	40
Oštećenje sluha	Ž	544	2261	2563
	M	831	3962	3434
Razvojne teškoće koje nisu definirane listom oštećenja	Ž	4476	-	-
	M	7623	-	-
Poremećaji iz autističnog spektra	Ž	500	217	9
	M	2047	613	5
Gluhosljepoća	Ž	1	11	5
	M	2	10	5

2.2. Odabir težine korisnika invalidskih kolica

Prema [11] prosječna tjelesna masa muškaraca starijih od 65 godina iznosi 90,7 kg, a kod žena 71,18 kg. Radi se o istraživanju povezanosti pretilosti i nastajanja kroničnih bolesti gdje je zaključeno kako je u ovom uzorku vidljiva povećana tjelesna masa kod oboljelih od kardiovaskularnih bolesti. Na osnovu ovih podataka uz faktor sigurnosti za daljnju analizu uzeta je zaokružena vrijednost tjelesne mase od približno 100 kg odnosno opterećenje od 1000 N.

2.3. Odabir vrste invalidskih kolica

Prema podacima s hrvatskog tržišta invalidskih kolica, 65+ dobna skupina danas je još uvijek vjernija ručnim invalidskim kolicima. Najveći razlog tome je sama cijena koja je puno manja u odnosu na motorna invalidska kolica, a drugi razlog je njihovo jednostavno korištenje. Proučavajući ručna invalidska kolica na hrvatskom tržištu uočena su tri primjerka prikazana na slikama.

Slika 9 prikazuje prilagodljiva invalidska kolica *Motus VR* koja su namijenjena odraslim osobama, odnosno starijoj životnoj dobi te podnose maksimalnu tjelesnu težinu od 140 kg. Materijal okvira je aluminijska legura i raspon njihove mase iznosi od 12,8 do 20,7 kg.

Ovakva kolica mogu se u nekoliko poteza jednostavno sklopiti i pripremiti za transport, a njihova posebnost je što imaju podesivi naslon za ruke te prilagodljiv naslon za leđa što olakšava kretanje korisnika [12].



Slika 9. Ručna invalidska kolica *Motus VR* [12]

Slika 10 prikazuje invalidska kolica pod nazivom *Avantgarde* koja su namijenjena odraslim osobama i mladeži te podnose maksimalnu tjelesnu masu od 180 kg. Radi se o aktivnim

kolicima koja zbog svoje fleksibilnosti i raznovrsnosti pružaju mogućnost aktivnog slobodnog vremena te putovanja u daleke zemlje. Materijal okvira je aluminijska legura, a njihova ukupna masa iznosi otprilike oko 17 kg [13].



Slika 10. Ručna invalidska kolica *Avantgarde* [13]

Slika 11 prikazuje invalidska kolica pod nazivom *Ventus* koja su namijenjena mladeži, odraslima i starijoj životnoj dobi te podnose maksimalnu tjelesnu masu do 140 kg. Riječ je o još jednim aktivnim invalidskim kolicima za svestrano korištenje s krutim i individualno izrađenim okvirom [14].



Slika 11. Ručna invalidska kolica *Ventus* [14]

S obzirom da se u ovom radu radi analiza ručnih invalidskih kolica za stariju životnu dob, invalidska kolica *Avangarde* mogu se odmah eliminirati iz analize, što znači da preostaju *Ventus*

i *Motus* invalidska kolica. Njihova najveća razlika je u tome što su *Ventus* kolica napravljena s krutim okvirom dok *Motus* kolica imaju „X“ mehanizam sklapanja.

Raznim analizama donesen je zaključak kako je za guranje čvrstih kolica potrebno manje snage jer se kod guranja sklopivih kolica veliki dio energije gubi u pokretima unutar njihove strukture. Sklopiva kolica imaju veći broj dijelova zbog čega je okvir fleksibilniji te time uzrokuje veće deformacije kod pokretanja samih kolica i čini ih manje izdržljivijim i trajnijim. Stoga je potrebno češće održavanje kako bi svi dijelovi bili u dobrom radnom stanju. Invalidska kolica s fleksibilnim okvirom sigurnija su kod vožnje neravnim terenom jer omogućuju da svi kotači budu u dodiru s podlogom kojom se kreću te bolje prigušuju vibracije [15].

2.4. Prepoznavanje potreba

Nakon što je odabrano da model okvira invalidskih kolica bude namijenjen za 65+ dobnu skupinu koja koristi ručna invalidska kolica, napravljen je intervju s korisnikom. Korisnik je osoba iz staračkog doma koja posjeduje ručna sklopiva invalidska kolica tako da će se u daljnjem razmatranju uzeti u obzir dizajn sklopivih invalidskih kolica. Kao što je vidljivo u tablici 3 dobivene su povratne informacije o prednostima i nedostacima korištenja ručnih sklopivih invalidskih kolica. Time su dobivene potrebe koje će se pretvoriti u konstrukcijske zahtjeve okvira invalidskih kolica potrebne kako bi se napravio model za daljnju analizu.

Tablica 3. Intervju s korisnikom ručnih sklopivih invalidskih kolica

Naziv projekta: Ručna sklopiva invalidska kolica		Datum: 07.02.2023.	
Tip korisnika: 65+ dobna skupina	Korisnik: xxxxxxxxxxxxxxxxxx	Intervjuirala: Ana Marija Kolar	
Pitanje	Odgovor korisnika	Interpretacija potrebe	Važnost
Tipičan način korištenja proizvoda?	Omogućava mi da se mogu kretati i samostalno obavljati svakodnevne radnje	Invalidska kolica moraju omogućiti mobilnost korisnika.	Ključno
Što voli na postojećem proizvodu?	- Jednostavno i lako sklapanje - Izdržljivost kolica - Jednostavno korištenje	- Kolica moraju imati jednostavan mehanizam sklapanja čime se olakšava njihov transport. - Sve komponente moraju biti izrađene od materijala koji sprječava da dođe do loma, trajnih plastičnih deformacija ili pukotina. - Kolica moraju imati lako dostupne upute i oznake za korištenje.	- Poželjno - Ključno - Ključno
Što ne voli na postojećem proizvodu?	- Visoka cijena - Neudobnost nakon dužeg sjedenja - Osjećaj nestabilnosti tokom vožnje nestabilnim terenom - Otežano samostalno guranje kolica zbog velike mase.	- Izrada kvalitetnih kolica prihvatljivog cjenovnog ranga. - Izrada udobnijeg naslona i sjedala. - Izrada kolica u dimenzijama koje će osigurati stabilnost kolica. - Izrada invalidskih kolica od materijala sa što manjom gustoćom i manjim dimenzijama.	- Poželjno - Poželjno - Ključno - Ključno
Prijedlog poboljšanja postojećeg proizvoda?	- Niska cijena - Udobnije sjedenje	- Balans između kvalitete i cijene. - Potreba za ergonomičnijem konstruiranjem invalidskih kolica	- Poželjno - Ključno

2.5. Konstrukcijski zahtjevi

Analizom dobivenih odgovora iz intervjua dobiveni su zahtjevi koji se postavljaju na invalidskih kolica, a iz njih su izdvojeni oni koji se odnose na konstrukcijske zahtjeve okvira invalidskih kolica. Ti zahtjevi se odnose na:

- a) čvrstoću
- b) stabilnost
- c) mobilnost
- d) udobnost za korisnika (vibracije)
- e) sposobnost sklapanja i transporta.

Čvrstoća konstrukcije je jedan od bitnih faktora kod konstrukcije okvira invalidskih kolica jer se ovisno o njoj procjenjuje trenutak pojave loma, elastičnih te trajnih plastičnih deformacija ili pukotina. Izdržljivost, a time i trajnost utječu na pouzdanost invalidskih kolica koja se može održati ukoliko se pri konstruiranju uzme u obzir manje pomičnih dijelova, bolji materijali te izrada dijelova koji se mogu lako i jednostavno popraviti [2]. S obzirom da je čvrstoća proizvoda određena vrstom materijala, više o ovoj tematici biti će objašnjeno u poglavlju *Izbor materijala*.

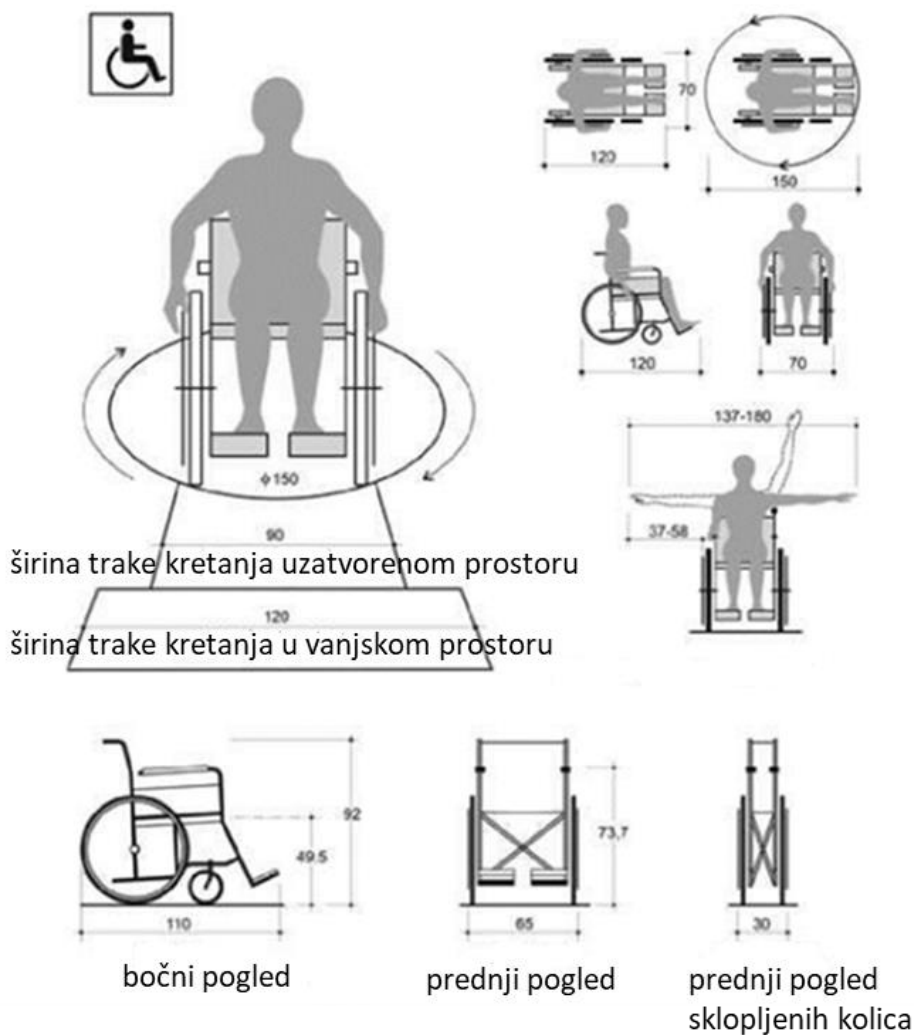
Stabilnost je faktor koji velikim dijelom definira sigurnost upravljanja invalidskim kolicima. U ovom slučaju postoje statička i dinamička stabilnost te stražnja, prednja i bočna stabilnost.

Statička stabilnost invalidskih kolica jest stabilnost koja se promatra kada su kolica u stanju mirovanja, a dinamička kada su kolica u pokretu odnosno kod kretanja preko neravnina i kosih površina. Stražnja stabilnost odnosno otpor od prevrtanja unatrag na invalidskim kolicima postiže se ugradnjom pomoćnih kotača na stražnjem dijelu kolica dok prednja stabilnost ovisi o veličini i položaju prednjih pomoćnih kotača. Bočna stabilnost ovisi o širini kolica. Kada su šira imaju bolju bočnu stabilnost no time se otežava kretanje užim prolazima. Kao što je vidljivo na slici 12, ugradnjom ukošenih kotača povećava se bočna stabilnost na ukošenom terenu no istodobno se povećava širina kolica te otežava njihovo kretanje [16].



Slika 12. Bočna stabilnost sa ukošenim kotačima s obzirom na ukošeni teren [16]

Mobilnost invalidskih kolica određena je time kolika je mogućnost korisnika da može svojim invalidskim kolicima proći kroz uske prolaze te prostore sa različitom gustoćom okolnih prepreka. Na slici 13 su prikazane dimenzije invalidskih kolica prema kojima se prilagođavaju prostori potrebni za kretanje osoba u invalidskim kolicima. Cilj konstruiranja današnjih invalidskih kolica jest napraviti proizvod koji će se moći slobodno kretati u svim prostorima, a ne samo prilagođenim za njihove korisnike. Mogućnost invalidskih kolica da prođu uz što užu prolaze postiže se konstruiranjem kolica sa što manjom širinom, ali se pri tome mora paziti da smanjenje širine kolica ne utječe negativno na ostale parametre.



Prosječne dimenzije invalidskih kolica

Slika 13. Prostor potreban za kretanje osoba u invalidskim kolicima [17]

Vrlo česta prepreka za invalidska kolica su stolovi, a sposobnost zavlačenja kolica ispod stolova određena je visinom na kojoj se nalazi sjedalo. Ta visina se dobije zbrajanjem duljine potkoljenice i sigurnosne visine noge od tla [18].

Sposobnost kolica da se mogu slobodno okretati u malim prostorima određena je duljinom najveće dijagonale kolica [18].

Sposobnost kretanja preko prepreka određena je time kolika je mogućnost korisnika da upravlja kolicima preko mekanih podloga ili preko povišenih prepreka. Kretanje po mekanoj podlozi ovisi o kontaktnoj površini te o težini samih kolica. Kretanje preko povišenih prepreka ovisi o veličini i okretnosti pomoćnog kotača te o njegovoj udaljenosti od centra težine korisnika [18].

Transport autobusom, taksijem ili vlakom ovisi o veličini, dizajnu i težini invalidskih kolica. Općenito vrijedi da je prijevoz bilo kojim prijevoznim sredstvima praktičniji ako invalidska kolica imaju mogućnost sklapanja [18].

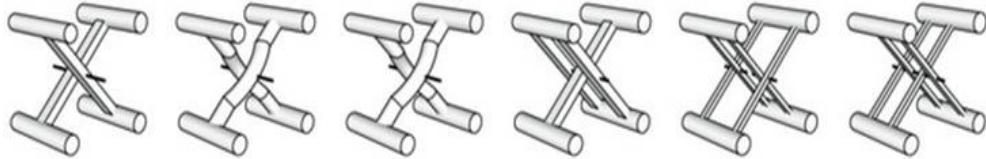
Iako invalidska kolica omogućuju mobilnost i samostalnost svojim korisnicima, ona su zapravo fiziološki štetna nakon dugotrajnijeg korištenja. Otprilike 50 % korisnika ručnih invalidskih kolica ima problema s bolovima u ramenu koji su posljedica velikog mehaničkog opterećenja na ramenima tijekom guranja kolica. Isto tako, čestim korištenjem invalidskih kolica korisnici se izlažu vibracijama i udarcima na cijelo tijelo koje premašuju preporuke norme ISO 2631-1:1997, što ima negativan utjecaj na udobnost i sigurnost. Smanjenje mehaničkog rada koji je potreban za guranje kolica može pomoći u smanjenju rizika od ozljede ramena, dok smanjenje prijenosa vibracija okvira invalidskih kolica može smanjiti opterećenje cijelog tijela.

Prema istraživanju dokazano je kako izbor između sklopivog i čvrstog okvira ima utjecaj na prijenos vibracija i smanjenje mehaničkog rada potrebnog za guranje kolica. Testiranjem je dokazano kako se kod sklopivih invalidskih kolica javlja pojačana bol u ramenima te veći prijenos vibracija u odnosu na čvrsta invalidska kolica [19].

Prema [19] napravljeno je istraživanje u kojem se ispitalo kakav učinak ima materijal okvira na prijenos vibracija i smanjenje mehaničkog rada kod guranja ručnih invalidskih kolica. Prije konačnih rezultata pretpostavljeno je kako invalidska kolica s okvirom od kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima i s okvirom od titanija slabije prenose vibracije od aluminijskih okvira invalidskih kolica.

Drugo područje istraživanja odnosilo se na to kakva je ovisnost između prijenosa vibracija i utrošenog mehaničkog rada za guranje kolica. U ovom istraživanju sudjelovalo je 10 ispitanika koji su naizmjenično pokretali šest ručnih sklopivih invalidskih kolica izrađenih od titanija, kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima i aluminijskih. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4.

Tablica 4 Invalidska kolica razvrstana prema težini, materijalu i sklopivom dizajnu [19]

Oznake okvira	Ti	C	Al 1	Al 2	Al 3	Al 4
Model	2GX	Helio C1	Helio A7	Quickie 2	Litestream XF	Catalyst 5
Proizvođač	TiLite	Motion Composites		Sunrise Medical	Pride Mobility	Ki Mobility
Masa, kg	10,25	8,57	9,54	10,37	12,48	9,44
Materijal	Titanij	CFRP	Aluminij	Aluminij	Aluminij	Aluminij
Dizajn sklapanja						

Dokazano je da invalidska kolica koja prenose manje vibracija zahtijevaju više mehaničkog rada kod guranja kolica [19].

Utvrđeno je da invalidska kolica od titanija ne apsorbiraju vibracije bolje od aluminijskih, no ipak su zahtijevala najmanje mehaničkog rada za guranje. Najmanju sposobnost prijenosa vibracija pokazala su invalidska kolica izrađena od kompozita s ugljičnim vlaknima. Također je utvrđeno da je dizajn sklapanja važan kao i materijal okvira kada se optimizira mehanički rad i prijenos vibracija. Razlike u dizajnu okvira od aluminijskih daju isti raspon vrijednosti vibracija i mehaničkog rada kao i primjena različitih materijala za isti okvir (titanij, aluminij, kompozit) [19].

2.6. Model okvira invalidskih kolica

2.6.1. Dimenzije okvira invalidskih kolica

S obzirom da nigdje nisu poznati pouzdani iznosi dimenzija samog okvira invalidskih kolica, model okvira napravljen je pomoću dimenzija cijelih kolica koja su konstruirana prema prostorima namijenjenima za prolaz invalidskim kolicima što je vidljivo na slici 13.

U tablici 5 navedene su dimenzije cijelih invalidskih kolica prema [17] te dimenzije modela okvira koji će se koristiti u daljnjoj analizi.

Tablica 5. Dimenzije invalidskih kolica i modela okvira invalidskih kolica

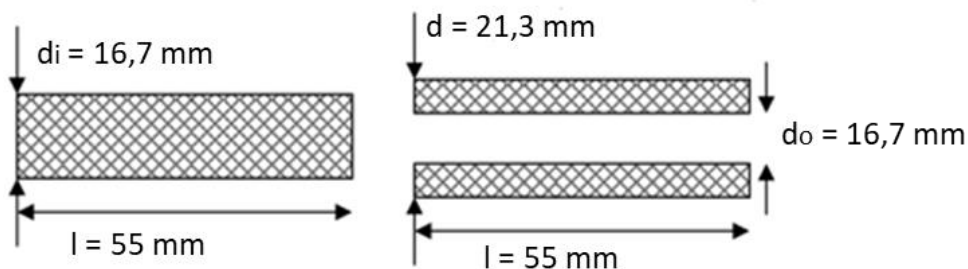
Parametri	Invalidska kolica	Okvir invalidskih kolica
Ukupna širina, mm	650	460
Ukupna duljina, mm	1100	736
Ukupna visina, mm	920	850
Visina sjedala, mm	495	400

2.6.2. Oblik profila okvira invalidskih kolica

Kod konstruiranja ručnih sklopivih invalidskih kolica bitno je paziti da ona budu što lakša kako bi korisnik lakše upravljao njima te kako bi bila što lakša pri podizanju kod njihovog transporta. Početkom 20. stoljeća krenulo se istraživati u tom smjeru pa su u ono doba rađena invalidska kolica kao čelična sklopiva kolica koja su težila i do 30 kg dok danas ona teže od 4 kg pa na više. Kako bi se postigla manja masa izrađuju se okviri cjevastih profila s ojačanjima na kritičnim mjestima kako bi okvir izdržao normalna opterećenja tijekom očekivanog vijeka trajanja. Proračunski dokaz o tome kako se uz odabir odgovarajuće geometrije može dobiti lakša i čvršća konstrukcija, nalazi se u sljedećem podnaslovu.

2.6.3. Naprezanje osovine

Osovine koje se primjenjuju na invalidskim kolicima zavaruju se na mjesta postavljanja dvaju velikih kotača i dvaju manjih pomoćnih kotača. Slika 14 prikazuje primjer šuplje i pune osovine pri čemu su obje iste duljine L koja za izabrani model invalidskih kolica iznosi 55 mm, obje su napravljene iz istog materijala te opterećene istim momentom M .



Slika 14. Puna osovina (lijevo) i šuplja osovina (desno) s pripadajućim dimenzijama

Naprezanje pune osovine računa se prema izrazu:

$$\sigma_{max} = \frac{M d_i}{2I}, \quad (1)$$

gdje se moment inercije pune osovine računa prema izrazu:

$$I = \frac{\pi d_i^4}{64}. \quad (2)$$

Uvrštavanjem (2) u (1) dobiva se izraz:

$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi d_i^3} = 2,187M, \quad (3)$$

dok se masa pune osovine duljine 55 mm dobiva prema izrazu:

$$m = \rho \frac{\pi d_i^2}{4} l = 12,05\rho \quad (4)$$

Naprezanje šuplje osovine računa se prema izrazu:

$$\sigma_{max} = \frac{M d}{2I}, \quad (5)$$

gdje je moment inercije šuplje osovine:

$$I = \frac{\pi}{64} (d^4 - d_o^4) \quad (6)$$

Uvrštavanjem (6) u (5) dobiva se izraz:

$$\sigma_{max} = \frac{32Md_0}{\pi(d^4 - d_0^4)} = 1,694 \quad (7)$$

Masa šuplje osovine duljine 55 mm dobiva prema:

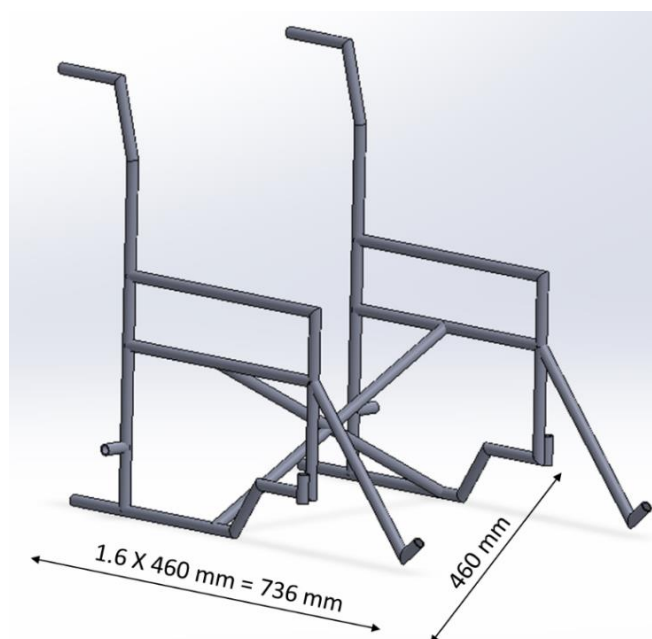
$$m = \rho \frac{\pi(d^2 - d_0^2)}{4} l = 7,55\rho \quad (8)$$

Iz izračuna se vidi kako je šuplja osovina 29 % čvršća te 60 % lakša od pune osovine. Time se zaključuje kako se primjenom pravilne geometrije može izraditi znatno čvršći i lakši dio što je primijenjeno na ovom modelu okvira invalidskih kolica.

2.6.4. Zlatni rez

Zlatni rez ili zlatni omjer definira se kao zakon koji kaže da se manji dio odnosi prema većem kao veći prema ukupnom. Zbog praktičnosti uglavnom se ne upotrebljava njegova točna vrijednost koja iznosi 1,618 već približna, a radi se o proporciji koja se često nalazi u prirodi te je korisna i u inženjerskoj primjeni [20].

Jedan od razloga zašto dizajn ovog okvira invalidskih kolica izgleda privlačno je taj što ima proporcije ukupne širine i dužine blizu zlatnog reza, slika 15. Osim vizualnog efekta ovim proporcijama je postignuta stabilnost i uravnoteženost invalidskih kolica.



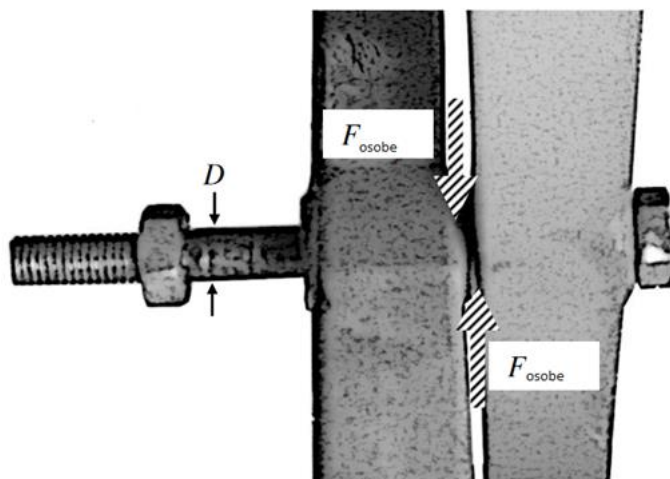
Slika 15. Zlatni rez okvira invalidskih kolica

2.6.5. Kut naslona

Kut naslona definira se kao kut između sjedala i naslona za leđa i u većini slučajeva taj kut iznosi oko 90 stupnjeva. Invalidska kolica koja imaju podesiv naslon često nemaju mogućnost sklapanja, stoga je kod ovog modela taj dio fiksiran. U donjem dijelu leđa nalazi se naslon pod kutom od 90 stupnjeva te u gornjem dijelu tijela s nešto većim kutom od 90 stupnjeva kako bi se dobila veća sloboda gibanja tim dijelom tijela.

2.6.6. Smična naprezanja

U normalnim uvjetima kada su invalidska kolica na ravnoj podlozi, ne javlja se smično naprezanje vijaka, no ukoliko su izložena udarnim opterećenjima potrebno je osigurati da vijak bude dovoljno izdržljiv i u takvim uvjetima. Prilikom savijanja okvira invalidskih kolica, smična naprezanja najčešće se javljaju na vijku koji spaja dva kraka „X“ dijela okvira. Ovdje će se za procjenu smicanja koristiti opterećenje mase osobe koja sjedi u invalidskim kolicima kao što je prikazano na slici 16. Mora se uzeti u obzir kako je stvarno opterećenje nekoliko puta veće pod utjecajem raznih udarnih opterećenja.



Slika 16. Vijak na „X“ dijelu invalidskih kolica, opterećen na smicanje [21]

Smično naprezanje izračunato je prema formuli:

$$\tau = \frac{F_o}{A} \quad (9)$$

gdje je:

$$F_o = 1000 \text{ N}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,54 \text{ mm}^2. \quad (10)$$

Nakon uvrštavanja svih poznatih vrijednosti dobiva se iznos smičnog naprezanja:

$$\tau = \frac{1000}{78,54} = 12,732 \text{ MPa} \quad (11)$$

Za materijal vijka odabran je konstrukcijski čelik E335 s granicom tečenja od 325 MPa i faktorom sigurnosti 2.

$$\sigma_{dop} = \frac{325}{2} = 162,5 \text{ MPa} > 12,732 \text{ MPa} \quad (12)$$

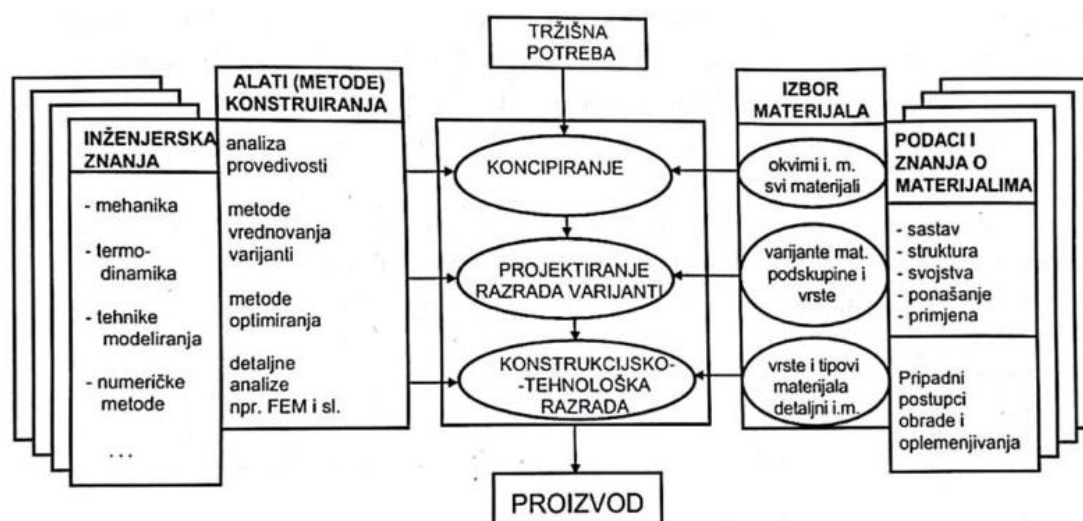
S obzirom da je smična čvrstoća vijka mnogo veća od izračunatog smičnog naprezanja, vijak je dovoljno izdržljiv na „X“ dijelu okvira invalidskih kolica.

3. IZBOR MATERIJALA

3.1. Povezanost izbora materijala i postupka konstruiranja

Izbor optimalnog materijala je jedna od bitnih stavki u cijelom procesu razvoja proizvoda koja uvelike doprinosi da se razvije kvalitetan, a istodobno financijski i estetski prihvatljiv proizvod. Uz izbor optimalnog materijala kvalitetnija svojstva proizvoda mogu se dobiti i unapređivanjem postupka izrade te postupka konstruiranja [22]. Okvirni izbor materijala odrađuje se u početnim fazama razvoja proizvoda odnosno u fazi koncipiranja i projektiranja. Zbog neplaniranih grešaka u razvoju materijal je moguće mijenjati u kasnijim fazama izrade i nabave.

Faze koncipiranja, projektiranja te konstruiranja dijelova i tehnološka razrada početni su dio procesa razvoj proizvoda, a u svakoj toj fazi prisutan je proces biranja materijala, slika 17.

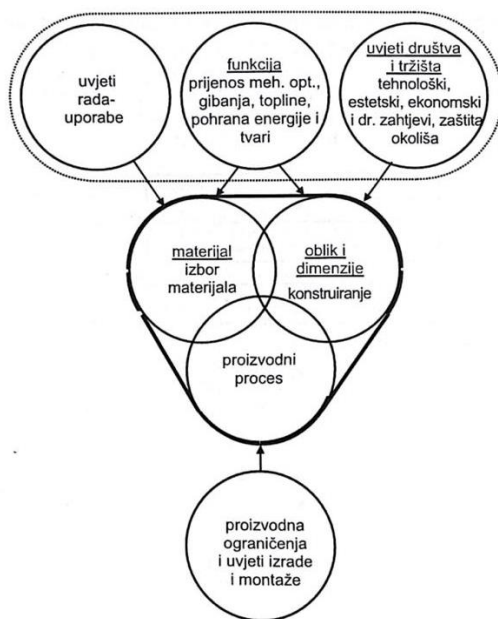


Slika 17. Izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda [22]

Koncipiranje varijanti proizvoda je faza u kojoj kod izbora materijala sve varijante dolaze u obzir te uglavnom dominiraju skupine uobičajenih materijala međusobno usporedivih prema širokom polju mogućnosti. U ovoj fazi definiraju se zahtjevi za izbor materijala na temelju osnovnih svojstava materijala. U fazi projektiranja ili razradi varijanti rješenja provode se dublje analize konstrukcijskih zahtjeva i osnovnih funkcija te detaljnijim proučavanjem širokog spektra baze podataka o materijalima, odabiru se prikladne podskupine i vrste materijala. Faza konstruiranja dijelova i tehnološka razrada jest dio u kojem se provode detaljnije analize funkcije novog proizvoda te analiza posljedica koje nastaju primjenom tih proizvoda. U ovoj

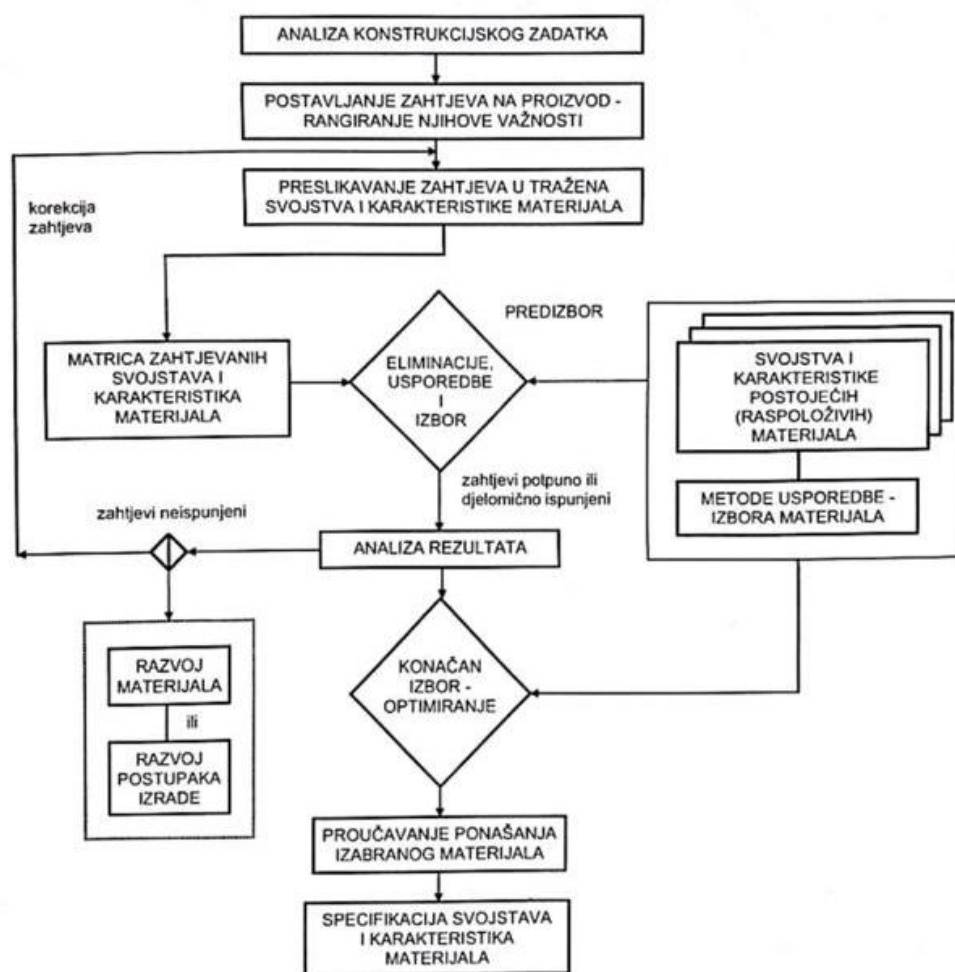
fazi je sužen izbor materijala čija svojstva se moraju dobro provjeriti i uzeti iz pouzdanih izvora. Svojstva materijala imaju veliki utjecaj na konačne konstrukcijske proračune, razradu tehnoloških procesa i kalkulaciju troškova [22].

Najbolja rješenja postižu se kada u razvoju nekog proizvoda ravnopravno i istodobno sudjeluju konstrukcijsko oblikovanje, izbor materijala i izbor postupaka proizvodnje, kako je prikazano na slici 18. Ukoliko dođe do promjene nekih značajki iz bilo kojeg područja, primjerice promjena dimenzija, oblika, materijala ili procesa proizvodnje, to će se odraziti i na preostala područja što može dovesti do potpuno novih rješenja. Pri razvoju bilo kojeg proizvoda materijal se ne smije nikad unaprijed definirati, već njegov izbor treba proizaći iz istodobnog razmatranja različitih mogućnosti da se ispune svi zahtjevi koji se postavljaju na proizvod. Pri konstruiranju materijali se najčešće biraju na temelju procjena i iskustvu pojedinaca ili na temelju informacija iz već izvedenih konstrukcija. Puno rjeđe se izbor optimalnog materijala provodi na temelju kvantitativnih ili objektivnih faktora koji obuhvaćaju zahtjeve i svojstva koji su mjerljivi i mogu se brojčano izraziti. Također se rijetko materijal bira na temelju ograničenja nametnutih internim propisima i normama te nacionalnim normama koje definiraju prioritetne vrste materijala za konkretnu proizvodnju. Ograničenja mogu biti povezana i s mogućnostima nabave pojedinih materijala te proizvodnim mogućnostima, bilo da se radi o proizvodnji u vlastitom pogonu ili proizvodnji kod kooperanata [23].



Slika 18. Povezanost konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupaka proizvodnje [23]

Sve veći broj vrsta tehničkih materijala i postupaka proizvodnje te pojava sve složenijih zahtjeva na proizvode vode k tome da se izbor materijala, umjesto na iskustvu, temelji na raznim metodičkim postupcima. Na slici 19 prikazan je dijagram toka izbora materijala koji se koristi kod razvoja nekog proizvoda, a započinje analizom konstrukcijskog zadatka na temelju kojega se postavljaju zahtjevi na proizvod [24].



Slika 19. Dijagram toka izbora materijala [24]

Nakon što se zahtjevi na proizvod rangiraju prema njihovoj važnosti, slijedi preslikavanje zahtjeva u tražena svojstva materijala do kojih se dolazi iz raznih provjerenih izvora. Kvalitetni izvori podataka mogu biti različiti katalozi proizvođača, priručnici, baze podataka informacijskih sustava te druge podloge i pomagala. Svi navedeni izvori trebaju omogućiti kvantitativnu usporedbu svojstava različitih tehničkih materijala. Danas postoji mnoštvo različitih tehničkih materijala s ogromnom količinom informacijama o njihovim svojstvima i

karakteristikama. Bez pomoći računala teško je naći tražene podatke i usporediti različite materijale. Ponekad zahtjevi na proizvod kao i zahtjevi na materijale mogu biti previsoko postavljeni pa dolazi do toga da nije moguće pronaći optimalan materijal, a u takvim situacijama dolazi do ponovnog razmatranja mogućnosti ublažavanja prvobitno zadanih zahtjeva [23].

3.2. Postavljanje zahtjeva na okvir invalidskih kolica

Na temelju intervjua koji je odrađen u poglavlju 2 dobivene su korisnikove potrebe pomoću kojih su postavljeni konstrukcijski zahtjevi potrebni za modeliranje okvira invalidskih kolica, a uz postavljanje ostalih zahtjeva dobiva se popis svih zahtjeva koji se odnose na okvir invalidskih kolica prikazanih u tablici 6.

Tablica 6. Zahtjevi na okvir invalidskih kolica

Zahtjevi na okvir invalidskih kolica
okvir kolica ne smije puknuti pod teretom korisnika
okvir kolica ne smije se previše elastično deformirati, jer time gubi svoj željeni geometrijski oblik
okvir kolica bi trebao biti što lakši kako bi se njima jednostavnije i lakše rukovalo
okvir kolica treba biti što jednostavniji za izradu koristeći konvencionalne metode oblikovanja i obrade
okvir kolica treba biti izdržljiv i dugovječan odnosno bilo bi dobro kada bi izdržao što duži niz aktivnog korištenja
okvir kolica treba biti udoban što znači da je poželjno da se vibracije nastale tijekom upotrebe što manje prenose na korisnika
otpornost na atmosfersku koroziju, dezinfekcijska sredstva i sredstva za čišćenje zbog sigurnosti, estetike i taktilnosti
estetičnost i taktilnost kako bi bio ugodan na dodir s obzirom na temperaturu i teksturu (hrapavost) okvira
okvir kolica treba biti ekonomski opravdane cijene kako bi bio dostupan široj populaciji
recikličnost kako bi se naglasila važnost ekologije odnosno ponovne uporabe iskorištenih i odbačenih stavki

3.3. Preslikavanje zahtjeva u tražena svojstva i karakteristike materijala

Nakon postavljanja zahtjeva na okvir invalidskih kolica slijedi njihovo preslikavanje u tražena svojstva i karakteristike materijala. Svojstva koja treba imati materijal za okvir invalidskih kolica prikazana su u tablici 7, a njihov detaljan opis, pomoću kojeg su provedene metode izbora materijala, naveden je u ovom poglavlju.

Tablica 7. Svojstva i karakteristike materijala

Svojstva i karakteristike materijala
dovoljna čvrstoća materijala da može izdržati zadano opterećenje
zadovoljavajuća krutost
što manja gustoća
otpornost na krhki lom odnosno što bolja lomna žilavost
što bolja otpornost na atmosfersku koroziju i sredstva za čišćenje
što bolja zavarljivost i oblikovljivost
ugodan osjećaj u dodiru s kožom - odnosno taktilnost
što niža cijena materijala
što bolja sposobnost recikliranja

3.3.1. Dovoljna čvrstoća materijala da može izdržati zadano opterećenje

Okvir kolica mora izdržati težinu korisnika, stoga je potrebna dovoljna čvrstoća materijala. Čvrstoća se definira kao otpornost materijala na plastične i elastične deformacije ili na lom pod djelovanjem kratkotrajnog statičkog opterećenja na normalnoj temperaturi. Veličine koje se dobiju pri statičkom vlačnom ispitivanju materijala su modul elastičnosti, granica tečenja ili konvencionalna granica tečenja, vlačna čvrstoća, istezljivost te sposobnost suženja presjeka. Pri izboru materijala obično se traže što više vrijednosti navedenih svojstava kako ne bi došlo do loma te prekomjernih elastičnih i plastičnih deformacija. Na temelju navedenih svojstava mogu se donijeti zaključci i o drugim važnim mehaničkim svojstvima kao što su žilavost, vrijednost

plastične rezerve te dinamička izdržljivost. Žilavost materijala se može procijeniti na temelju površine ispod krivulje σ - ϵ i viša je što su više vrijednosti čvrstoće i duktilnosti materijala. Vrijednost plastične rezerve ovisi o granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći, a na temelju vrijednosti vlačne čvrstoće može se procijeniti i dinamička izdržljivost materijala. Osim vlačne čvrstoće o sigurnosti od loma govore vrijednosti tlačne, savojne i smične čvrstoće.

Kako konstrukcije tijekom svog životnog vijeka ne bi smjele ući u područje plastične deformacije, pri konstrukcijskim proračunima vrijednost granice tečenja puno je važnija od vrijednosti vlačne čvrstoće. Prema vrijednostima granice tečenja, svi konstrukcijski materijali mogu se svrstati u jednu od četiri razine:

1. materijali niske čvrstoće kod kojih je $R_{p0,2} < 250$ MPa
2. materijali srednje čvrstoće kod kojih je $R_{p0,2}$ između 250 i 750 MPa
3. materijali visoke čvrstoće kod kojih je $R_{p0,2}$ između 750 i 1500 MPa
4. materijali ultravisoke čvrstoće kod kojih je $R_{p0,2}$ viša od 1500 MPa [25].

Ako se primjene materijali s višom granicom tečenja mogu se smanjiti nosivi presjeci konstrukcijskog dijela. Biranjem materijala sa što višom granicom tečenja smanjuje se volumen konstrukcije, masa te troškovi materijala i obrade [23].

Prilikom proračuna nosivosti okvira invalidskih kolica s obzirom na njegovo opterećenje i dimenzije dobiva se minimalna granica tečenja materijala. Na osnovu minimalne granice tečenja uz odgovarajući stupanj sigurnosti sužava se izbor prihvatljivih materijala.

3.3.2. Zadovoljavajuća krutost

Okvir kolica ne smije se previše elastično deformirati, jer onda gubi svoj željeni geometrijski oblik, stoga je potrebno da okvir bude izrađen od materijala koji posjeduje odgovarajući modul elastičnosti.

Krutost materijala se izražava preko modula elastičnosti (E) kod vlačnog, tlačnog i savojnog opterećenja te modula elastičnosti (G) kod torzijskog i smičnog opterećenja. Za metalne materijale vrijednost modula elastičnosti je konstanta neovisna o promjeni sastava ili strukture. Modul elastičnosti polimernih materijala jako je ovisan o temperaturi i trajanju opterećenja. Veliki utjecaj na vrijednosti modula elastičnosti ima vrsta opterećenja pa se dosta razlikuju vrijednosti utvrđene pri vlačnom, tlačnom i savojnom opterećenju. Kod kompozitnih materijala modul elastičnosti može se mijenjati u širokom rasponu vrijednosti ako se varira materijal matrice, vrsta, udio i orijentacija ojačala. Krutost, odnosno modul elastičnosti ovisan je o

temperaturi, gdje s porastom temperature pada vrijednost modula elastičnosti. Stoga je ova ovisnost izuzetno bitna kod konstruiranja mehanički i toplinski opterećenih dijelova [23].

Na krutost konstrukcije ne utječe samo modul elastičnosti određenog materijala nego i oblik i dimenzije presjeka, što se iskazuje preko momenta tromosti presjeka.

Kod većine konstrukcija traži se što manja elastična deformacija (što viši modul elastičnosti) i što manja masa dijela. Omjer između vrijednosti modula elastičnosti i gustoće nekog materijala naziva se specifična krutost materijala i predstavlja parametar vrednovanja s obzirom na krutost uz minimalnu masu. Gustoća i modul elastičnosti su važna svojstva i za druge parametre vrednovanja koji se definiraju s obzirom na funkciju, geometriju i zadana ograničenja nekog konstrukcijskog dijela. U tablici 8 navedene su prosječne vrijednosti modula elastičnosti i specifične krutosti te drugih parametara krutosti koji povezuju modul elastičnosti i gustoću materijala [26].

Tablica 8. Prosječne vrijednosti modula elastičnosti i specifične krutosti različitih materijala [26]

Vrsta materijala	E GPa	$\rho \cdot 10^3$ kg/m ³	(E/ρ) (poredak)	$(E^{1/2}/\rho)$ (poredak)	$(E^{1/3}/\rho)$ (poredak)
Čelici	210	7,8	26,5 (5)	1,8 (8)	0,76 (10)
Al-legure	70	2,7	25,9 (6)	3,1 (6)	1,53 (6)
Mg-legure	40	1,8	22,2 (8)	3,5 (4)	1,90 (3)
Ti-legure	120	4,5	26,7 (4)	2,4 (7)	1,09 (8)
73 % epoks. smola + E-stakl. vl.	55,9	2,2	25,8 (7)	3,4 (5)	1,76 (5)
70 % epoks. smola + S-stakl. vl.	62,3	2,1	29,5 (3)	3,7 (3)	1,88 (4)
63 % epoks. smola + uglj. vl.	158,7	1,6	98,6 (1)	7,8 (1)	3,36 (1)
62 % epoks. smola+ aramidna vl.	82,8	1,4	60,0 (2)	6,6 (2)	3,16 (2)
PA+30 %stakl. vlakana	3,5	1,2	2,9 (9)	1,6 (9)	1,27 (7)
PP	0,4	0,9	0,4 (10)	0,7 (10)	0,79 (9)

Izraz E/ρ predstavlja mjerodavnu vrijednost kod vlačnog i tlačnog opterećenja okruglih punih presjeka, izraz $E^{1/2}/\rho$ kod savijanja i izvijanja okruglih punih presjeka, izraz $E^{1/3}/\rho$ kod savijanja pravokutnih presjeka i izvijanja ploče. Za slučaj kada je uz male elastične deformacije potrebna i što manja masa, iz tablice 7. je vidljivo kako polimerni materijali ojačani vlaknima predstavljaju najbolje rješenje [26].

3.3.3. Otpornost na krhki lom odnosno što veća lomna žilavost

Poznato je da postoji krhki i žilavi lom, a njihova osnovna razlika je u tome što krhki lom karakterizira brzo i nekontrolirano širenje pukotine bez nastanka plastične deformacije, dok žilavi lom karakterizira pojava plastične deformacije nakon koje slijedi lom. Ne postoji neka čvrsta veza između žilavosti i ostalih mehaničkih svojstava, ali može se reći da veću žilavost imaju materijali koji uz visoku čvrstoću imaju i dobru istezljivost. Također je uobičajeno da materijali s većom tvrdoćom imaju manju žilavost. Kod svih materijala žilavost se smanjuje sa sniženjem temperature [23].

Otpornost materijala na nastajanje loma može se ispitati na dva načina:

1. ispitivanjem žilavosti na Charpyjevom batu (KU ili KV)
2. određivanjem lomne žilavosti (područje mehanike loma)

Pri ispitivanju žilavosti na Charpyjevom batu određuje se udarni rad loma koji predstavlja energiju utrošenu za trganje ispitnog uzorka određenog oblika i dimenzija. Kako žilavost materijala jako ovisi o temperaturi, ispitivanje žilavosti konstrukcijskih materijala provodi se pri normalnoj i na sniženim temperaturama. Za većinu materijala određuje se prijelazna temperatura (T_p) koja predstavlja granicu između krhkog i žilavog područja istog materijala. Nekim konstrukcijskim materijalima žilavost postupno pada s padom temperature, a neki naglo prelaze iz žilavog u krhko područje što je nepovoljnije [23].

Kod materijala koji imaju postupni prijelaz iz žilavog u krhko ponašanje, udarni rad loma nije dovoljno dobar pokazatelj žilavosti. Kod takvih materijala određuje se lomna žilavost (K_{IC}) kao veličina faktora intenzivnosti naprezanja koje uzrokuje nestabilno širenje pukotine. Izrazom (13) dobiva se maksimalna veličina pukotine pomoću koje se uz poznat iznos naprezanja može provjeriti pouzdanost (14) neke konstrukcije [23].

$$a = \left(\frac{f^2}{\pi \cdot \alpha^2} \right) \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (13)$$

$$K_{IC} = \alpha \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (14)$$

gdje je:

a – veličina pukotine (pogreške)

α – korekcijski faktor za geometriju i položaj pukotine

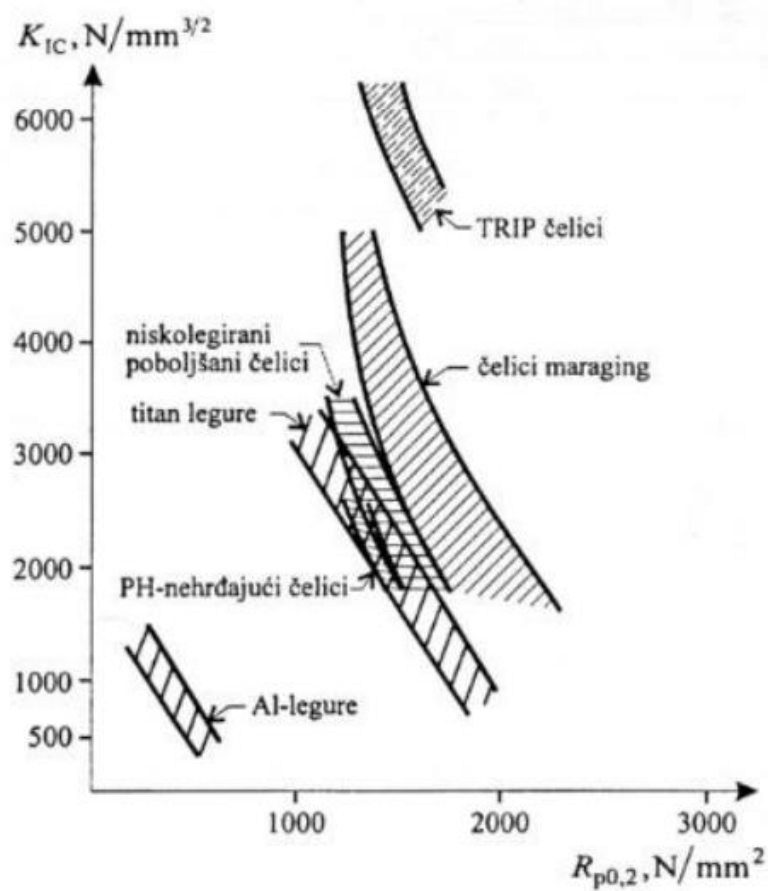
σ – naprezanje

f – omjer granice razvlačenja i radnog naprezanja

K_{IC} – lomna žilavost

$R_{p0,2}$ – konvencionalna granica razvlačenja

Za definirane konstrukcijske faktore određuje se omjer $K_{IC}/R_{p0,2}$ i što je njegova vrijednost viša, to se tolerira veća pukotina prema kojoj se onda međusobno uspoređuju materijali. Iz izraza (14) vidljivo je kako lomna žilavost varira u ovisnosti o naprezanju, obliku i dimenzijama pukotine, no bitno je spomenuti kako osim toga ovisi i o sastavu te mikrostrukтури materijala. Prema slici 20 može se iščitati da su lomna žilavost i konvencionalna granica razvlačenja obrnuto proporcionalne te da su prisutne različite vrijednosti lomne žilavosti unutar iste skupine materijala zbog razlike u njihovim mikrostrukturama i sastavu [23].



Slika 20. Ovisnost lomne žilavosti i konvencionalne granice razvlačenja za neke skupine metalnih materijala [27]

3.3.4. Što manja gustoća

Okvir kolica bi trebao biti što lakši kako bi se njima što lakše rukovalo, zato je bitno da bude izrađen od materijala što manje gustoće. Vrijednosti gustoće tehničkih materijala kreću se u širokom rasponu i pri izboru optimalnog materijala gustoća često ima visok faktor važnosti.

3.3.5. Što bolja otpornost na atmosfersku koroziju i sredstva za čišćenje

Okvir invalidskih kolica ne bi smio korodirati tijekom normalne uporabe, stoga je potrebna dovoljno dobra otpornost korištenog materijala na atmosfersku koroziju. Također treba uzeti u obzir korozijsku postojanost materijala prema sredstvima za čišćenje te dezinfekciju.

Korozija se javlja kao kemijski ili elektrokemijski proces kojim se, zbog djelovanja okolnih medija, razara materijal. Dokazano je kako korozijsko razaranje materijala i konstrukcija dovodi do većih gubitaka materijala i izaziva više štete nego mehaničko trošenje, lomovi i

prekomjerne deformacije. Kod korozijski otpornijih materijala u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manje intenzivnog razaranja i do manje pojave neželjenih promjena mikrostrukture i svojstava [23].

Na brzinu i vrstu korozijskih procesa utječu unutrašnji faktori odnosno stanje površine, čistoća i udio uključaka, sastav i ujednačenost sastava, mikrostruktura i zaostala naprezanja. Vanjski faktori također utječu na brzinu i vrstu korozijskih procesa. Među njih se ubrajaju vrsta medija i njegov sastav, prisutnost bakterija u mediju, tlak okolnog medija i promjene tlaka, sadržaj kisika u mediju i odzračivanje i sl. Otpornost na koroziju određenog materijala može se jednoznačno povezati sa strukturom i vezom među atomima, kemijskim sastavom, prisutnošću nečistoća, stanjem površine i postupcima obrade [23].

Otpornost na koroziju može se procijeniti preko različitih pokazatelja:

- gubitka mase i volumena
- promjena mehaničkih i ostalih svojstava
- oštećenja na površini
- mikrostrukturnih promjena u presjeku i sl [23].

Izbor prikladnog materijala s obzirom na korozivnost određuje se na temelju kvalitativnih ocjena.

Postoje različiti načini zaštite konstrukcije od korozije, a najčešće korišteni su isključivanje uzroka korozije (kondenzacije vode, naprezanja, prisutnost elektrolita i sl.), utjecanje na medij dodavanjem stabilizatora ili inhibitora, drugačije konstrukcijsko oblikovanje dijela ili sklopa, primjena materijala koji su otporni na koroziju, primjena zaštitnih prevlaka te primjena katodne ili anodne zaštite [23].

Na okviru invalidskih kolica ne smiju se dopustiti oštećenja od korozije koja bi doprinijela smanjenju početnih dimenzija, a time i njegove nosivosti. Korozijski produkti bi također loše utjecali na taktilnost i estetska svojstva.

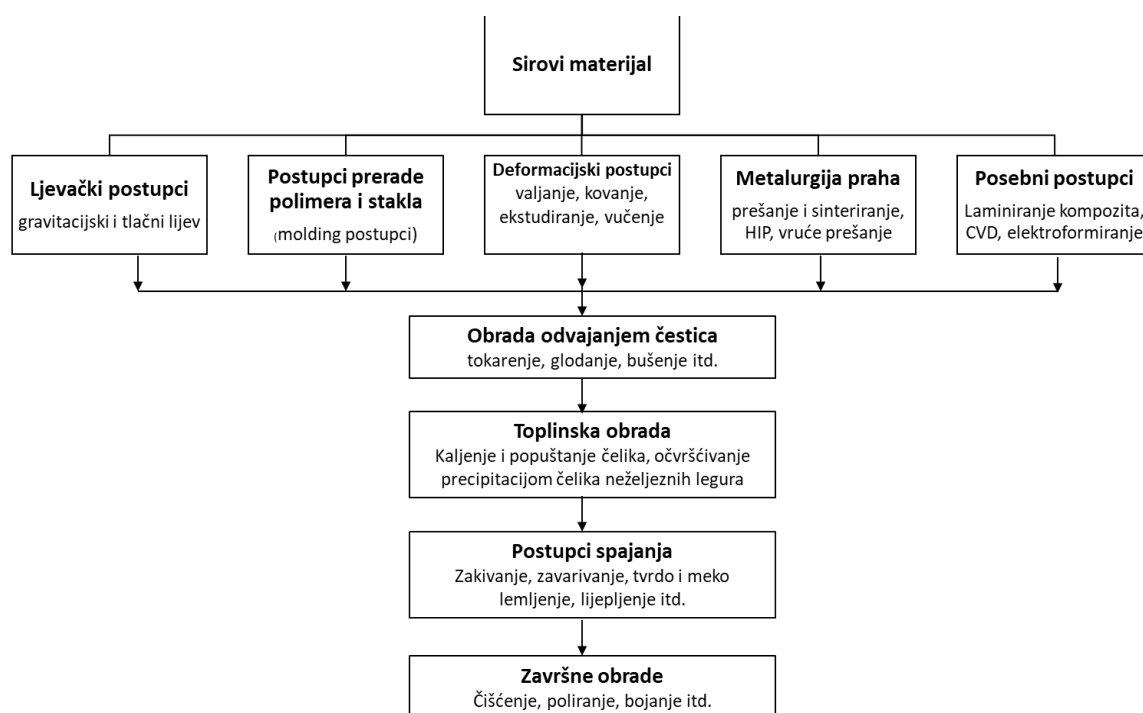
3.3.6. Tehnologičnost - mogućnost spajanja i oblikovljivost

Izrada metalnih invalidskih kolica uključuje procese hidroformiranja i savijanje ekstrudiranih cijevi u određeni oblik, rezanje cijevi pod kutom na određenu duljinu, TIG zavarivanje i na kraju toplinska obrada kako bi se smanjila unutarnja naprezanja nastala kod zavarivanja [28].

Uz metale danas se često okviri invalidskih kolica izrađuju od polimera ojačanih karbonskim vlaknima. Izrada takvih invalidskih kolica razlikuje se od izrade metalnih. Primjerice takav

okvir nastaje slaganjem listova karbona impregniranih epoksi-em u kalup. Nakon njihovog raspoređivanja, vakuumiranjem kalupa postiže se željeni oblik okvira te izbacivanje viška epoksi smole. Stvrdnjavanje i poprimanje završnog oblika postiže se zagrijavanjem kalupa [29].

S obzirom da svaki materijal ima različite najbolje proizvodne mogućnosti postizanja konačnog oblika prikazanih na slici 21, materijali se ne mogu ocijeniti na temelju jednog tehnološkog svojstva. Kod izbora materijala za okvir invalidskih kolica tehnološkičnost je procijenjena u širem smislu, ocjenama od jedan do pet.



Slika 21. Devet skupina postupaka proizvodnje [22]

3.3.7. Što niža cijena materijala

Nabavljivost materijala je jedna od bitnih stavki kod nastanka novog proizvoda koja se vrlo često zanemaruje. Ukoliko se pravovremeno, već u fazi konstruiranja vodi računa o nabavljivosti materijala prema traženom obliku, stanju, dimenzijama, količini, roku nabave i cijeni, mogu se izbjeći nepotrebne izmjene u kasnijim završnim fazama te time eliminirati dodatni troškovi. Kod odabira materijala potrebno je sustavno pratiti stanje kod proizvođača materijala i u trgovačkoj mreži. Odgovarajući materijal prvo se traži na vlastitom skladištu, a ako ga nema može provjeriti mogućnost nabave kod kooperanata ili srodnih poduzeća, na

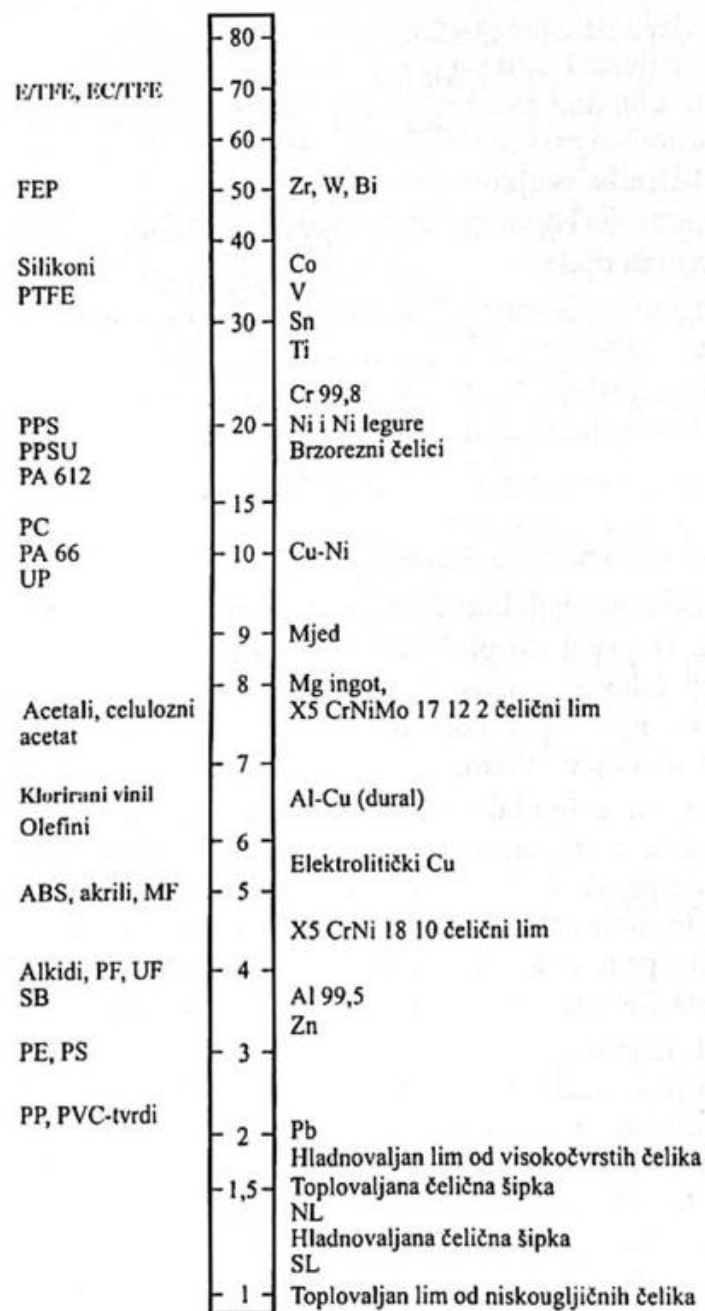
skladištima pojedinih trgovačkih kuća unutar zemlje ili u inozemstvu te kod proizvođača materijala u zemlji i inozemstvu. Na odabir određenog proizvođača i dobavljača veliki značaj će imati uvjeti nabave, vrijeme te rokovi nabave i isporuke, troškovi nabave te pouzdanost i solidnost. Također kod nabave materijala vodi se računa o tome da se osigura tražena kvaliteta i tražena količina po što nižim ukupnim troškovima [23].

Ovisno o tipu proizvoda i primijenjenim tehnologijama, udio cijene materijala u cijeni proizvoda se kreće od 0,2 do 0,8. Ovaj udio se povećava sa smanjenjem složenosti konstrukcije i povećanjem njihove masivnosti. Smanjenje ukupnih troškova materijala može se smanjiti smanjenjem mase i obujma ugrađenog materijala, primjenom materijala niže gustoće i više čvrstoće, smanjenjem osnovne cijene materijala, smanjenjem troškova nabave, smanjenjem troškova transporta i rukovanja, smanjenjem zaliha i troškova skladištenja, smanjenjem relativnih troškova proizvodnje u odnosu na alternativnu materijal te smanjenje troškova praćenja dokumenata i informacija o materijalima [23].

Neki od faktora koji utječu na cijenu materijala proizlaze iz postupaka njihovog preoblikovanja u poluproizvod ili konačan oblik kao primjerice cijena rudače i troškovi dobivanja sirovine, troškovi ekstrakcije iz rudače, troškovi čistoće i legiranja, troškovi oblikovanja u poluproizvod, standardizacije kvalitete materijala i dimenzija, troškovi praćenja i inventure, zemljopisni položaj i sl.

Kod odabira materijala prema cijeni treba imati na umu da jeftiniji materijal ne znači i dobivanje jeftinijeg proizvoda, primjerice ponekad je isplativije platiti višu cijenu materijala za povišenu čvrstoću zato što se time ugrađuje manja količina materijala [23].

Slika 22 prikazuje usporedbu nekih tehničkih materijala na temelju cijene po jedinici mase gdje je vruće valjani nelegirani čelik uzet kao osnova. Na temelju ove skale zaključuje se kako su svi oblici nelegiranih čelika, sivih ljevova i niskolegiranih čelika dosta jeftiniji od ostalih vrsta materijala dok su nikal i njegove legure oko 20 puta skuplji od nelegiranih čelika. Titanij i kositar su oko 30 puta skuplji od čelika, a volfram do 50 puta.



Slika 22. Usporedba nekih tehničkih materijala na temelju cijene po jedinici mase [26]

3.3.8. Taktilnost

Kad se govori o taktilnosti podrazumijeva se osjet koji doživljavamo dodirom, preko kože. Uključuje pojmove kao što su toplo/hladno, glatko/hrapavo i tvrdo/meko. Taktilnost se može povezati i procijeniti preko toplinske vodljivosti i hrapavosti površine. U slučaju izbora optimalnog materijala za okvir invalidskih kolica taktilnost je ocijenjena ocjenama od jedan do pet. Najvišu ocjenu su dobili materijali koji imaju nižu toplinsku vodljivost i kod kojih se može postići manje hrapava površina.

3.3.9. Mogućnost recikliranja

Iako recikličnost materijala prema potrebama korisnika nije stavljena u razmatranje kod izbora materijala, u današnje vrijeme smatra se kao jedan također bitan faktor. Recikliranjem se postiže očuvanje zaliha neobnovljivih izvora sirovina, ušteda energije pri dobivanju materijala iz sekundarnih sirovina te zaštita okoliša smanjivanjem količine odloženog otpada u okoliš. Danas se sve više primjenjuje metoda analize životnog ciklusa kojom se naglašava međusobni utjecaj svih procesa proizvodnje. Ova metoda omogućuje vrednovanje novih postupaka proizvodnje, materijala i tehnologija, čime se nastoji smanjiti utrošak energije i materijala, količina otpadnih tvari i štetnih plinova [23].

Mogućnost recikliranja se smanjuje povećanom primjenom kompozitnih materijala, primjenom većeg broja različitih vrsta materijala te primjenom zaštitnih slojeva za povećanje otpornosti na koroziju i trošenje. Neki od kriterija recikličnosti materijala mogu biti složenost prikupljanja, količina proizvedenih štetnih tvari i plinova kod recikliranja, tehnološka složenost odvajanja od ostalih materijala, tehnološka složenost i troškovi te kemijski sastav i svojstva recikliranog poluproizvoda [23].

3.4. Izračunavanje faktora važnosti

Pomoću faktora važnosti (B_i) određuje se kolika je relativna važnost pojedinog svojstva u odnosu na ostale. Faktori važnosti određuju se na temelju znanja, iskustva i subjektivne procjene stoga će se ovdje određivati prema potrebama i zahtjevima intervjuiranog korisnika iz poglavlja 3. Faktor važnosti svih traženih svojstava određeni su uz pomoć digitalno-logičke metode u kojoj je važnost svakog svojstva uspoređena s ostalim svojstvima. Važnijem svojstvu dana je ocjena 1, a manje važnom dana je ocjena 0 [23]. Ukupno je bilo osam svojstava. Broj pozitivnih odluka za svako svojstvo podijeljen je s ukupnim brojem mogućih međusobnih odnosa svojstava, koji u ovom slučaju iznosi 28. Zbroj faktora važnosti svih svojstava iznosi 1.

U tablici 9 prikazani su rezultati određivanja faktora važnosti svih svojstava na temelju kojih je proveden izbor materijala okvira za invalidska kolica. Najveće vrijednosti faktora važnosti dobili su gustoća (0,25), čvrstoća (0,21) i modul elastičnosti (0,18).

Tablica 9. Digitalno-logička metoda za okvir invalidskih kolica

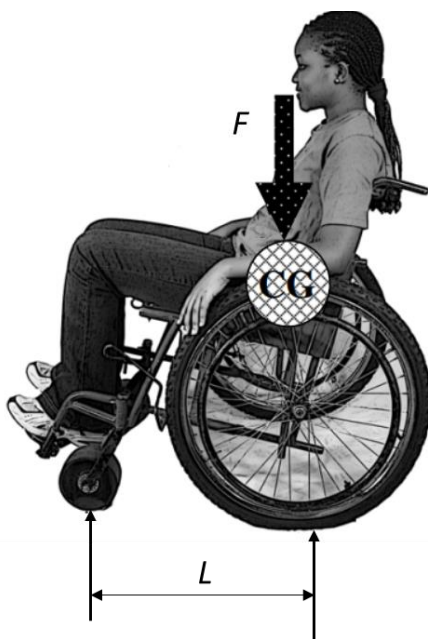
Svojstvo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	Poz. odluke	Faktor važnosti
R_e	1	1	0	1	1	1	1																						6	0,21
E	0							1	0	1	1	1	1																5	0,18
K_{IC}		0						0						0	1	1	1	1											4	0,14
ρ			1						1					1					1	1	1	1							7	0,25
TEH				0						0					0				0				0	1	0				1	0,04
ONK					0						0					0				0			1			0	0		1	0,04
TAK						0						0					0				0			0		1		0	1	0,04
CM							0						0					0				0			1		1	1	3	0,11
																													28	1,00

R_e – čvrstoća; E – krutost; K_{IC} – lomna žilavost (otpornost na krhki lom); ρ – gustoća; TEH – tehnologičnost; ONK – otpornost na koroziju; TAK – taktilnost; CM – cijena materijala

3.5. Kvantitativne metode izbora materijala

3.5.1. Karte svojstava materijala

Prema izračunatom faktoru važnosti osnovna i najbitnija svojstva kod razmatranja izbora materijala jesu čvrstoća, krutost i gustoća što znači da uz što manju masu okvira invalidskih kolica ne smije doći do plastičnih deformacija i loma. Okvir invalidskih kolica složno je savojno, torzijski i aksijalno opterećen. Pojednostavljeno se nosivi okvir invalidskih kolica može smatrati gredom duljine L opterećenom maksimalnom silom F koju okvir može podnijeti bez pojave plastičnih deformacija i loma, slika 23 [23].



Slika 23. Shema opterećenja invalidskih kolica [21]

Iznos maksimalno dopuštene sile kod savojno opterećene grede može se izraziti kao:

$$F_f = \frac{C_2 \cdot I \cdot R_f}{y_{max} \cdot L} \quad (15)$$

gdje je:

C_2 – konstanta koja ovisi o karakteristikama opterećenja

I/y_{max} – moment otpora

R_f – granica tečenja za metale i polimere, vlačna čvrstoća za keramiku, staklo i krhke polimere

L - duljina grede.

Prema [23] izraz za faktor oblika kod savojnog opterećenja iznosi:

$$O_s^f = \frac{16\pi \cdot I^2}{y_{maks}^2 \cdot S^3} \quad (16)$$

Iz (16) može se izvesti izraz za moment otpora:

$$\frac{I}{y_{max}} = \left(\frac{O_s^f}{16\pi} \right)^{1/2} \quad (17)$$

Ako se (17) uvrsti u (15) dobiva se sljedeći izraz za maksimalnu silu:

$$F_f = \left(\frac{C_2}{4\sqrt{\pi} \cdot L} \right) \left(\sqrt{O_s^f \cdot S^3} \right) (R_f) \quad (18)$$

Ako se (18) izrazi po ploštini presjeka S te ista uvrsti u izraz za izračunavanje mase:

$$m = A \cdot L \cdot \rho$$

dobiva se:

$$m = \left(\frac{F_f}{C_2} \right)^{2/3} 4\sqrt{\pi}(L)^{5/3} \cdot \left[\frac{\rho}{(O_s^f)^{1/3} \cdot R_f^{2/3}} \right] \quad (19)$$

Prema zahtjevima za materijal okvira invalidskih kolica masa okvira mora biti što manja pa prema tome treba biti što manji i treći član u izrazu (19), što znači da vrijednost izraza:

$$M_p = \left(\frac{R_f^{2/3}}{\rho} \right) \cdot (O_s^f)^{1/3} \quad (20)$$

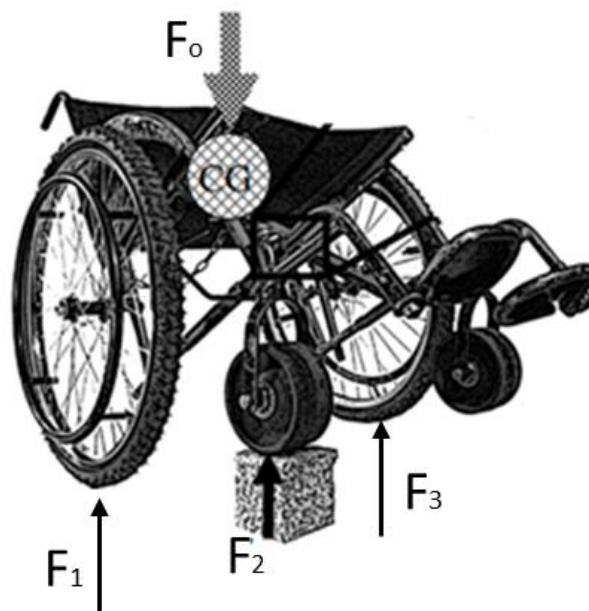
mora biti što viša.

Sljedeći korak je određivanje materijala koji imaju najvišu vrijednost izraza $R_f^{2/3}/\rho$, pomoću karte svojstava materijala. Karte svojstava omogućuju da se uspoređuju različiti materijali na temelju kombinacije različitih svojstava.

Kako bi se dobile potrebne vrijednosti R_f i ρ provest će se proračun naprezanja unutar provrta na „X“ dijelu okvira, područja koje je prema [21] uvijek u prenapregnutom stanju.

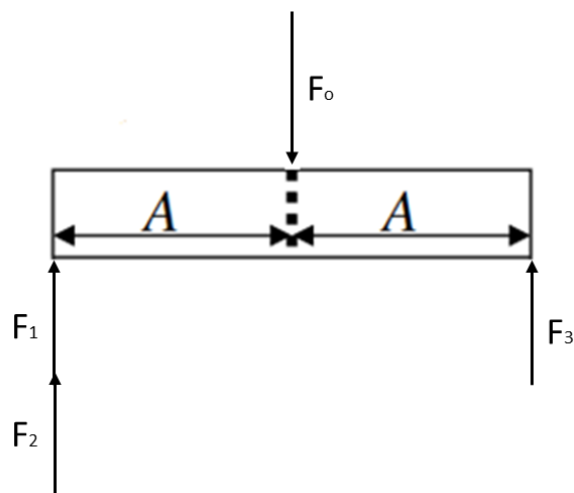
3.5.1.1. Naprezanje unutar provrta na „X“ dijelu okvira

Prilikom kretanja preko neravnog terena, jedan kotač se najčešće malo podigne kao što je vidljivo i na slici 24. Takva situacija uzrokuje naprezanja na provrtu za vijak na „X“ dijelu okvira.



Slika 24. Opterećenje invalidskih kolica prilikom kretanja neravnim terenom [21]

Prema slici 24 vidljivo je kako invalidska kolica u tom slučaju imaju tri kontaktne površine odnosno opterećenja F_1 , F_2 i F_3 te s gornje strane djelovanje sile težine osobe koja sjedi u invalidskim kolicima, F_0 . Poznato je kako težina osobe iznosi 1000 N, a F_3 koja je potrebna za daljnji proračun dobiva se iz simetrije invalidskih kolica kao što je prikazano slikom 25 i formulom (21).

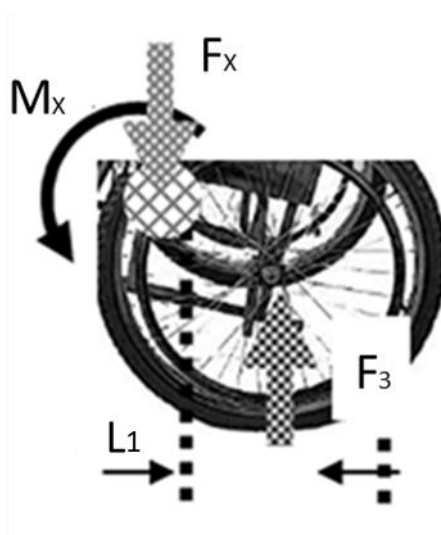


Slika 25. Izračun sile iz simetrije invalidskih kolica

$$F_3 = \frac{F_o}{2} \quad (21)$$

$$F_3 = \frac{1000}{2} = 500 \text{ N} \quad (22)$$

Kao što je vidljivo na slici 26 momentno opterećenje M_x na „X“ dijelu okvira radi sila F_3 na kraku L_1 koji iznosi 183 mm.



Slika 26. Prikaz opterećenja „X“ dijela okvira invalidskih kolica [21]

$$M_x = F_3 (L_1) \quad (23)$$

$$M_x = 500 \cdot 183 = 91500 \text{ Nmm} \quad (24)$$

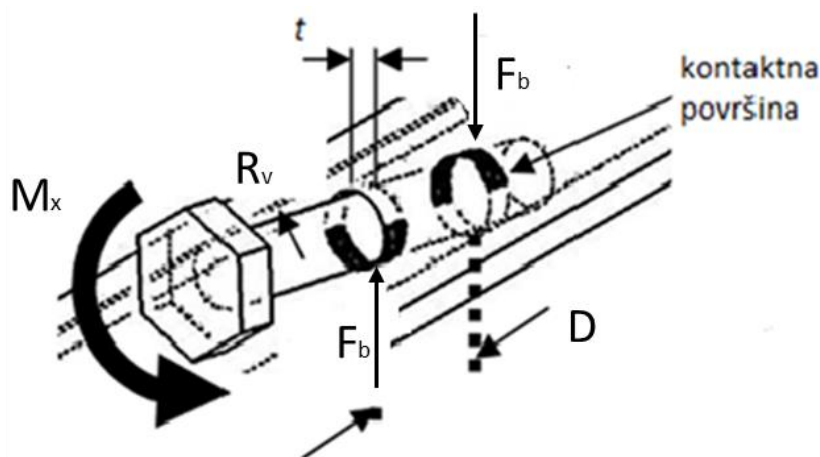
Sumom momenata oko provrta jedne noge „X“ dijela okvira dobiva se iznos sile F_b pomoću koje se izračunava naprezanje na kontaktnoj površini između vijka i provrta jedne noge „X“ dijela okvira invalidskih kolica, a detaljniji prikaz vidljiv je na slici 27.

$$F_b D - M_x = 0 \quad (25)$$

$$F_b = \frac{M_x}{D} = \frac{91500}{16,7} = 5479,04 \text{ N} \quad (26)$$

$$\sigma = \frac{F_b}{\pi R_v t} \quad (27)$$

$$\sigma = \frac{5479,04}{\pi \cdot 5 \cdot 2,3} = 151,65 \text{ MPa} \quad (28)$$

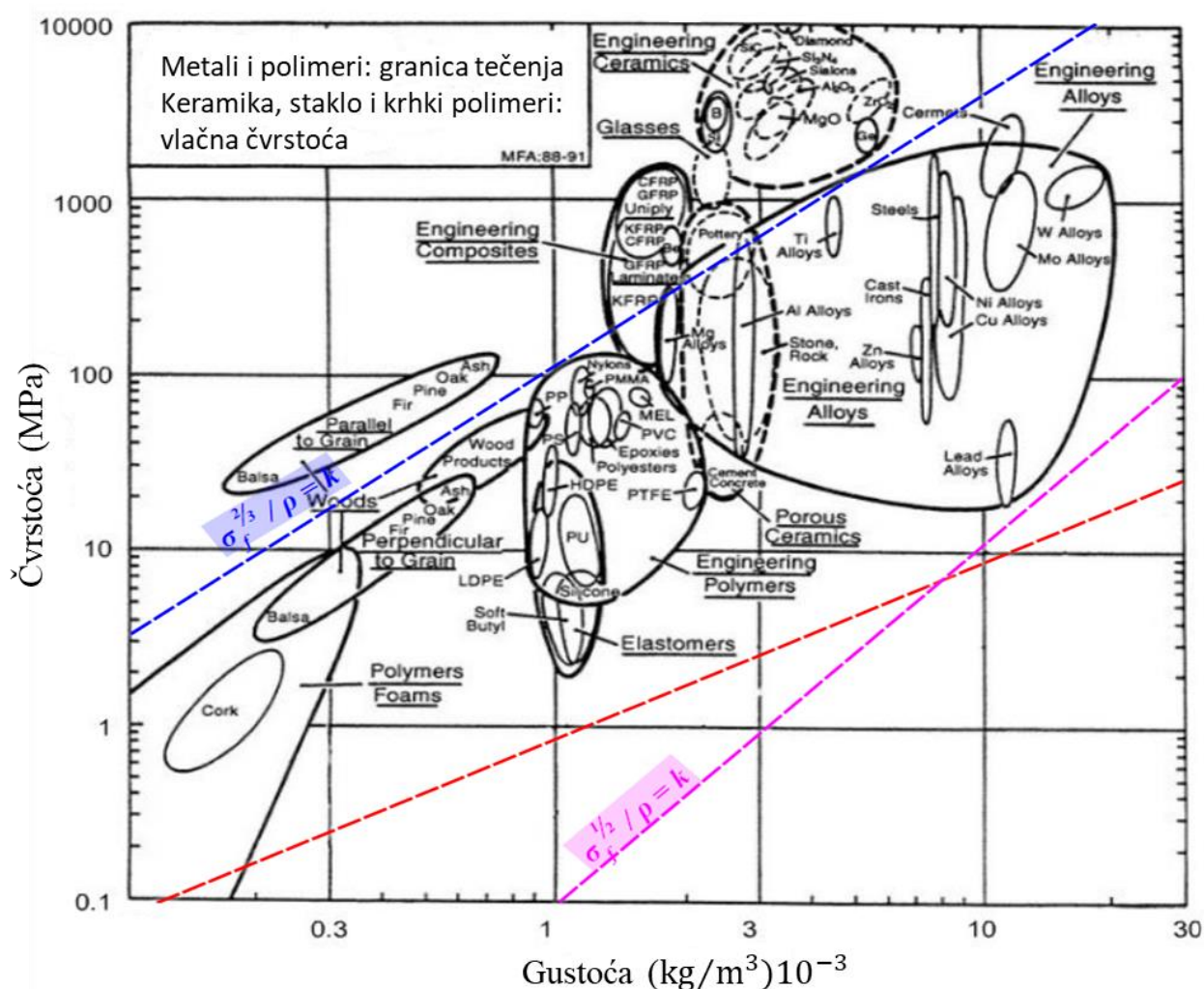


Slika 27. Prikaz opterećenja na jednoj nozi „X“ dijela okvira invalidskih kolica [21]

S obzirom da je dobiveno naprezanje od 151,65 MPa znači da uzimajući u obzir faktor sigurnost 2, razmatrat će se aluminijske legure, kao materijal od kojeg se danas najčešće izrađuju invalidskih kolica, s granicom tečenja većom od 303 MPa. Osim ove granice kao minimalne vrijednosti granice tečenja mora se uzeti u obzir da veličina M_p u izrazu (20) mora biti što veća. Kao platforma za traženje aluminijskih legura uzet je popis materijala iz programskog paketa

Solidworks 2021, a odabran je materijal Al 7075-T6 s granicom tečenja od 505 MPa te sa vrijednošću izraza $R^{2/3}/\rho = 23$.

Pomoću karte svojstava sa slike 28 dolazi se do prikladnih materijala ucrtavanjem linije $R_f^{2/3}/\rho = 23$ (plava linija) nagiba 2/3. Ovom linijom odvajaju se prikladni od neprikladnih materijala. Svi materijali koji se nalaze iznad linije zadovoljavaju zadane uvjete, a ispod linije ne ispunjavaju zadane uvjete. Prema tome u razmatranje za izbor materijala uzete su sljedeći materijali: čelik, precipitacijski očvrsnuta Al-legura 7075, Ti-legura, Mg-legura te polimeri ojačani ugljičnim i staklenim vlaknima.



Slika 28. Dijagram čvrstoća-gustoća s ucrtanom linijom pokazatelja [30]

3.5.1.2. Materijali za okvire invalidskih kolica

Čelici

Izrada invalidskih kolica od čelika ima najdužu povijest primjene no zbog svoje visoke gustoće, danas se ovaj materijal nastoji zamijeniti boljim opcijama. Niska cijena, jednostavna obrada i visoka čvrstoća su karakteristike kojima se čelik ističe u odnosu na druge konstrukcijske materijale. Ukoliko je dobro zaštićen od korozije omogućuje dobru trajnost proizvoda. Modul elastičnosti je gotovo jednak kod svih čelika i znatno je veći nego kod drugih tehničkih materijala [31].

Aluminijske legure

Aluminijske legure imaju nešto manju čvrstoću od čelika, ali su skoro tri puta lakše. S obzirom na druge materijale, aluminijske legure osim niske gustoće imaju dobru korozijsku otpornost, mogućnost recikliranja te jednostavnu obradu i oblikovanje. Zbog svoje dovoljne čvrstoće, relativno niske cijene i male mase, aluminijske legure su najčešći materijal koji se koristi kod proizvodnje okvira invalidskih kolica. Najprikladnija mehanička svojstva za ovu primjenu imaju legure iz serije 6XXX i 7XXX [32].

Titanijeve legure

Titanijeve legure imaju nisku gustoću i visoku čvrstoću no znatno je skuplji od aluminijskih legura te teži za obradu i zavarivanje. Još neke prednosti okvira invalidskih kolica izrađenih od titanijevih legura su dobra žilavost, dobra otpornost na koroziju te otpornost na visoke i niske temperature. Zbog ovakvih dobrih svojstava kojima se postiže dulji vijek trajanja, okviri invalidskih kolica izrađeni od titanijevih legura češće se primjenjuju kod izrade sportskih kolica [33].

Magnezijeve legure

Trenutno na tržištu nije moguće pronaći invalidska kolica izrađena od magnezijevih legura. Prednosti koje imaju su dobro prigušenje vibracija, niska gustoća te odlična rezljivost u odnosu na druge konstrukcijske materijale kao što su čelik, aluminijske i druge metalne legure. Veliki nedostatak magnezijevih legura jest loša otpornost na koroziju te nizak modul elastičnosti [33].

Polimerni kompoziti ojačani vlaknima

Uobičajeni materijal za laka invalidska kolica danas sve više postaju i polimeri ojačani ugljičnim vlaknima no njihov nedostatak jest visoka cijena. U usporedbi s metalima, kompoziti s ugljičnim vlaknima imaju puno manju gustoću i znatno višu krutost, odnosno imaju puno višu

specifičnu krutost. Njihova krutost ovisna je o smjeru vlakana, pa se željena svojstva okvira mogu posložiti usmjeravanjem vlakana i dodatkom slojeva u područjima gdje se žele dobiti bolja mehanička svojstva [33]. Osim kompozita sa ugljičnim vlaknima za izradu okvira invalidskih kolica mogu se primijeniti i polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima. Imaju nešto niža mehanička svojstva, ali i nižu cijenu od kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima.

Drvo

Drvo je prirodan, tehnički visoko vrijedan, obnovljiv i recikličan materijal koji je u današnjoj primjeni zamijenjen metalima i polimerima [33]. Prema karti svojstava drvo ulazi u područje razmatranja za izbor materijala okvira invalidskih kolica. Zbog nekih svojih prirodnih nedostataka i ograničenja danas se ovaj materijal ne upotrebljava kod izrade okvira invalidskih kolica.

3.5.2. Metoda utjecajnosti svojstava

Metoda utjecajnosti svojstava je jedna od kvantitativnih metoda izbora materijala i koristi se u slučaju razmatranja više svojstava uz pretvorbu dimenzijskih u bezdimenzijske vrijednosti. Dobivene bezdimenzijske vrijednosti se rangiraju na način da se najbolja vrijednost ocjeni s 100, a ostale se rangiraju prema toj vrijednosti. Ovisno o svojstvu koje razmatramo, najbolja vrijednost može biti minimalna ili maksimalna na toj listi. Za svojstva koja nije moguće ocijeniti brojčano nego prema procjeni ponašanja materijala, dodjeljuju se brojevi od 1-5 gdje broj 1 ima značenje nezadovoljavajućeg ponašanja, a broj 5 izvrsnog ponašanja.

Tablica 10 prikazuje predizbor materijala za okvir invalidskih kolica s odgovarajućim vrijednostima svojstava koja su izabrana na temelju zahtjeva.

Tablica 11. prikazuje skalirane vrijednosti svojstava na način da je najbolja vrijednost ocijenjena sa 100, a ostale prema izrazu (29) ukoliko se teži minimalnoj vrijednosti nekog svojstva te prema izrazu (30) ukoliko se teži maksimalnoj vrijednosti.

$$S_{vi} = \frac{\text{minimum vrijednosti u listi}}{\text{brojčana vrijednost svojstava}} \times 100 \quad (29)$$

$$S_{vi} = \frac{\text{brojčana vrijednost svojstava}}{\text{maksimalna vrijednost u listi}} \times 100 \quad (30)$$

Izračunate vrijednosti množe se s pripadnim faktorom važnosti čime se dobiva relativna važnost pojedinog svojstva. Optimalan materijal izabire se prema pokazatelju radne karakteristike koji

se dobiva zbrajanjem umnožaka faktora važnosti i skalirane vrijednosti pojedinog svojstva za svaki materijal.

Tablica 10. Predizbor materijala za okvir invalidskih kolica [34] [35] [36]

MATERIJAL	SVOJSTVA							
	Granica tečenja MPa	Modul elastičnosti MPa	Lomna žilavost $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	Gustoća kg/m^3	TEH	OK	TAK	Cijena materijala €/kg
Epoksid + ugljična vlakna	1740	129000	46,7	1580	5	4	4	33,05
TiAl5Sn2	660	111000	85	4500	2	5	2	44,73
MgAl6Zn	180	45000	17	1800	2	4	2	43
7075-T6	505	72000	43	2700	3	5	2	1,38
Epoksid + staklena vlakna	790	45000	10	2100	5	4	4	14,6
34CrMo4	530	210000	112	7800	4	3	2	0,66

Tablica 11. Skalirane vrijednosti

MATERIJAL	SVOJSTVA								Pokazatelj radne karakteristike
	Granica tečenja	Modul elastičnosti	Lomna žilavost	Gustoća	TEH	OK	TAK	Cijena materijala	
Epoksid+ ugljična vlakna	100	61	42	100	100	80	100	2	74
TiAl5Sn2	38	53	76	35	40	100	50	1	45
MgAl6Zn	10	21	15	88	40	80	50	2	37
7075-T6	29	34	38	59	60	100	50	48	46
Epoksid+ staklena vlakna	45	21	9	75	100	80	100	5	45
34CrMo4	30	100	100	20	80	60	50	100	62
Faktor važnosti	0,21	0,18	0,14	0,25	0,04	0,04	0,04	0,11	

Iz rezultata je vidljivo da je optimalan materijal za okvir invalidskih kolica, s najvećim pokazateljem vrednovanja radne karakteristike, kompozitni materijal napravljen od ugljičnih vlakana i epoksidne smole. Odmah iza njega slijedi čelik pa aluminijska legura. Iako je kompozitni materijal prema provedenom izboru optimalan materijal za izradu okvira invalidskih kolica, pojavljuje se pitanje da li će intervjuirani korisnik iz poglavlja 2 izabrati upravo ta invalidska kolica. Ako se bolje pogleda u tablicu 9. vidljivo je kako kompozit s ugljičnim vlaknima uvelike iskače sa svojom cijenom od ostalih materijala, dok čelik uvelike iskače sa svojim velikim iznosom gustoće. Na temelju intervjua može se zaključiti kako je korisnik kao najvažnije zahtjeve izdvojio da invalidska kolica moraju imati balans između kvalitete i cijene uz što manju masu. Prema tome ukoliko se tom korisniku ponude invalidska kolica od kompozitnog materijala s ugljičnim vlaknima, čelika i aluminijske legure najvjerojatnije će izabrati okvir od aluminijske legure zato što on daje upravo balans između cijene, kvalitete i mase u odnosu na ostale materijale.

Iako kompozitni materijal i čelik imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na aluminijske legure vrlo vjerojatno uz nešto lošija mehanička svojstva, ali bolju cijenu i manju masu okvir od aluminijske legure može zadovoljiti potrebe intervjuiranog korisnika. Za provjeru čvrstoće okvira invalidskih kolica izrađenih od aluminijske legure, provest će se numerička analiza u programskom paketu *Abaqus* kako bi se uvjerali da aluminijska legura, uz lošija mehanička svojstva u odnosu na optimalan materijal okvira, ipak zadovoljava normalnu upotrebu za intervjuiranog korisnika.

4. ANALIZA OPTEREĆENJA INVALIDSKIH KOLICA

4.1. Numerička analiza

Numerička analiza provedena je primjenom programskog paketa *Abaqus*, u kojem su korišteni 3D konačni elementi jer se radi o analizi 3D modela okvira invalidskih kolica. Radi se o metodi kojom se rezultati nastoje približiti realnim rješenjima pravilnim odabirom proračunskih modela i tipova konačnih elemenata. Dobiveno rješenje je točnije s povećanjem broja konačnih elemenata.

Analiza je provedena na pojednostavljenoj geometriji sklopivih ručnih invalidskih kolica prikazanoj na slici 29 koja je izmodelirana prema konstrukcijskim zahtjevima okvira invalidskih kolica iz poglavlja 2. Na pojednostavljenom modelu smanjen je broj komponenti u području „X“ mehanizma sklapanja koji je karakterističan za sklopiva ručna invalidska kolica čime se uvelike olakšava provođenje analize. Svakako se ove modifikacije moraju uzeti u obzir kod interpretacije i analize rezultata.



Slika 29. Model okvira invalidskih kolica za numeričku analizu

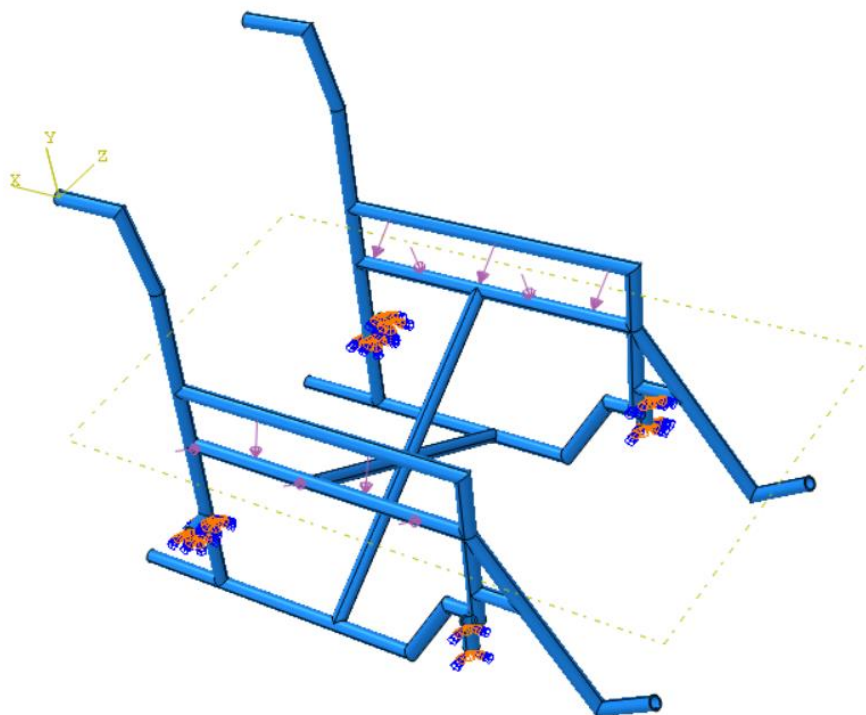
Kao što je već rečeno u poglavlju 3. za materijal okvira invalidskih kolica odabrana je aluminijska legura oznake EN AW-7075-T6 čija su mehanička svojstva potrebna za provedbu numeričke analize navedena u tablici 12.

Tablica 12. Mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-7075-T6

Modul elastičnosti, MPa	72000
Poissonov koeficijent, -	0,33
Gustoća, g/cm ³	2700

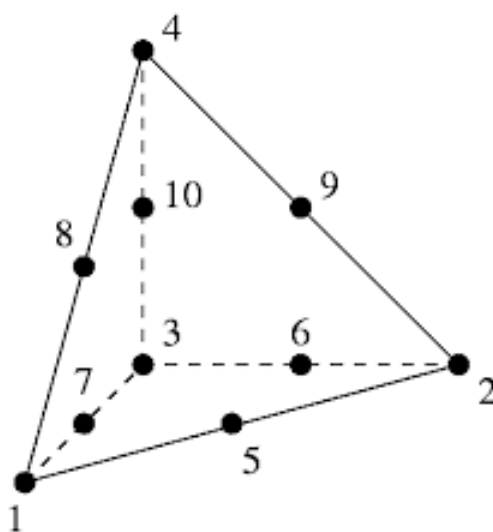
Numerička analiza u programskom paketu *Abaqus* započinje importiranjem .STEP modela kojem se u modulu *Property* dodaju vrijednosti svojstava materijala iz tablice 11. u polje *Mechanical – Elasticity – Elastic* unutar izbornika *Edit Material*. Nakon modula *Property* prelazi se na modul *Assembly* u kojem je konstrukcija okvira invalidskih kolica dodana na način da se mreža konačnih elemenata postavi na sami model potpuno neovisno o položaju u sklopu, pomoću opcije *Dependent*.

Korak opterećenja definira se u modulu *Step*, a zatim se u modulu *Load* definiraju opterećenja i rubni uvjeti pomaka. Opterećenja okvira za invalidska kolica u ovoj analizi uzeta su kao tlačno djelovanje po površini mjesta na kojem korisnik sjedi. Rubni uvjeti definirani su kao dva uklještenja na mjestu postavljanja dvaju velikih kotača te kao pomičan oslonac na mjestu postavljanja dvaju prednjih manjih kotača. Opterećenja i rubni uvjeti primijenjeni na modelu okvira invalidskih kolica prikazana su na slika 30.



Slika 30. Prikaz opterećenja i rubnih uvjeta postavljenih na okvir invalidskih kolica

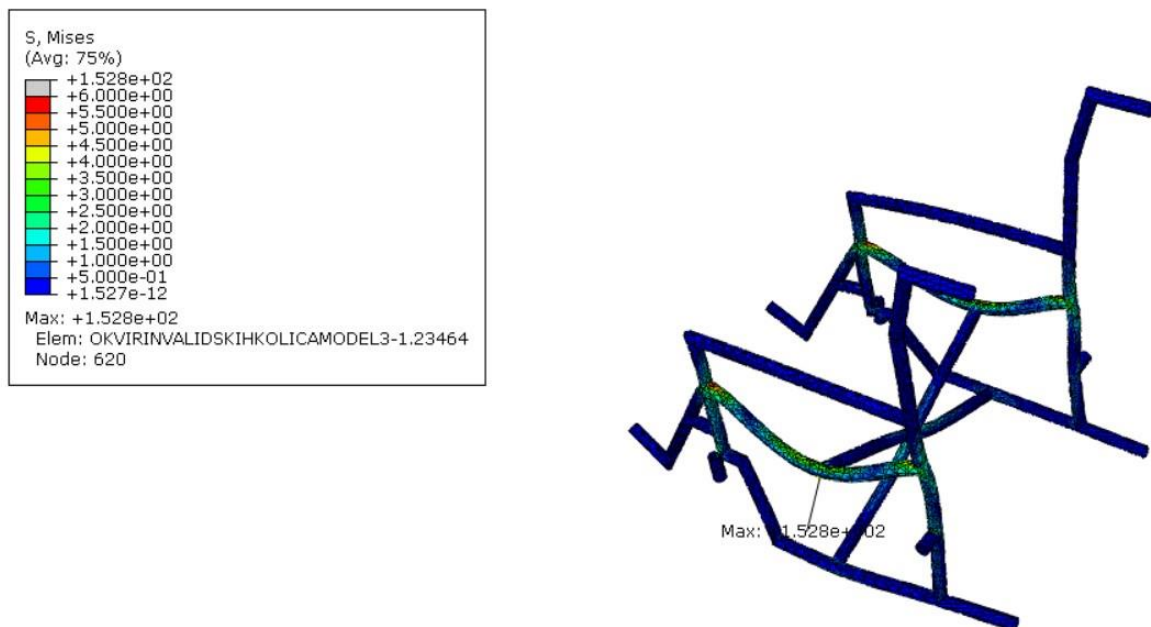
Sljedeći korak u ovoj analizi bio je u modulu *Mesh* odnosno stvaranje mreže konačnih elemenata. Uzeti su 3D tetraedarski konačni elementi za verifikacijske elemente, točnije prema opciji automatskog stvaranja mreže odabran je element C3D10, slika 31. Time su dobiveni zadovoljavajući rezultati numeričke analize.



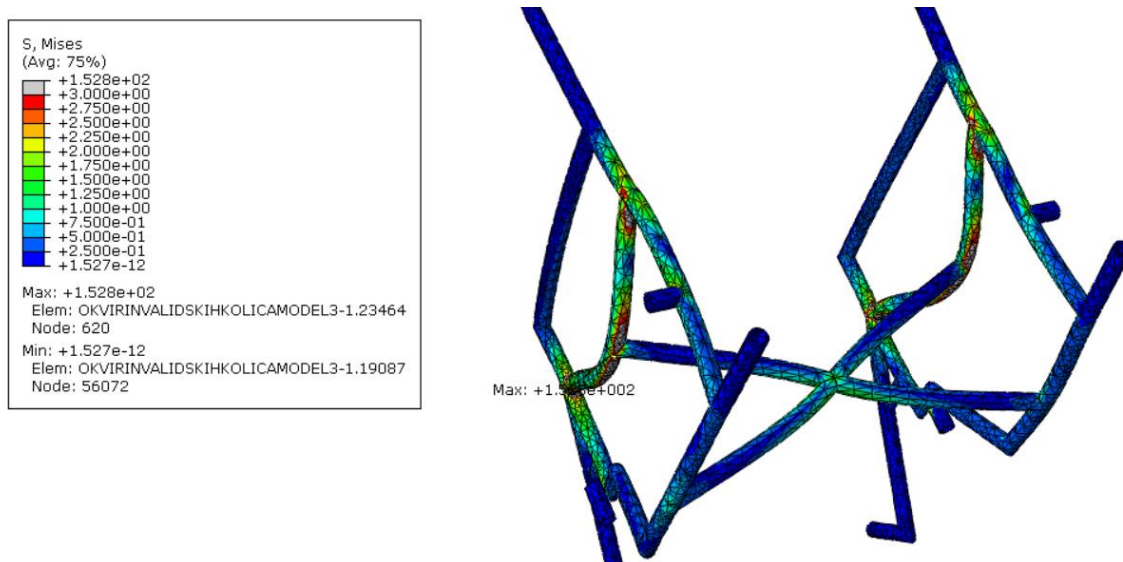
Slika 31. Tetraedarski konačni element drugog reda, C3D10

Provedeno je nekoliko analiza s različitim brojem konačnih elemenata kako bi se dobila pravilna konvergencija rezultata te je zaključeno kako gustoća mreže od 33996 tetraedarskih elemenata drugog reda (C3D10) daje najprihvatljivije rezultate.

Na slika 32 i slici 33 prikazana je raspodjela ekvivalentnih napreznja prema *von Misesu*.



Slika 32. Raspodjela ekvivalentnih napreznja prema *von Misesu* u MPa



Slika 33. Raspodjela ekvivalentnih napreznja prema *von Misesu* u MPa

Prema teoriji najveće distorzijske energije, ekvivalentno napreznje se računa prema izrazu:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)]} \quad (31)$$

Prema rezultatima dobivenim u programskom paketu *Abaqus* i normalna i tangencijalna naprezanja imaju podjednak utjecaj na ekvivalentni iznos naprezanja čija maksimalna vrijednost iznosi 152,8 MPa, slika 32.

Dopušteno naprezanje aluminijske legure EN AW-7075-T6 iznosi 505 MPa pa se prema tome dobiva iznos faktora sigurnosti:

$$S = \frac{\sigma_{dop}}{\sigma_{ekv}} = \frac{505}{152,8} = 3,3. \quad (32)$$

S obzirom na dobivenu vrijednost faktora sigurnosti zaključuje se kako je uvjet čvrstoće višestruko zadovoljen.

5. ZAKLJUČAK

Nastanak novog proizvoda dugotrajan je i zahtjevan posao u kojem proces izbora optimalnog materijala treba biti prisutan od početnih faza. Ravnopravnim i istodobnim sudjelovanjem konstrukcijskog oblikovanja, izbora materijala i izbora postupaka proizvodnje postiže se najbolje konačno rješenje. Proces izbora materijala počinje odabirom okvirnih vrsta materijala, čiji se izbor postepeno sužava kako se približava konačno rješenje.

U ovom radu proveden je izbor optimalnog materijala okvira ručnih sklopivih invalidskih kolica za osobe 65+ dobne skupine. Prema njihovim potrebama dobiveni su zahtjevi na okvir invalidskih kolica. Na temelju konstrukcijskih zahtjeva napravljen je model okvira za koji je proveden izbor optimalnog materijala. Uzimajući u obzir sve zahtjeve na okvir invalidskih kolica te njihovim preslikavanjem u svojstva i karakteristike materijala, provedene su kvantitativne metode izbora materijala. Digitalno-logičkom metodom dobiveni su faktori važnosti za sva svojstva. Najveći iznos faktora važnosti dobila su sljedeća svojstva: gustoća, čvrstoća i krutost. Kako bi suzili područje izbora materijala napravljen je predizbor materijala pomoću karte svojstava materijala. Vodeći se važnostima svojstava, predizbor materijala napravljen je prema odnosu čvrstoće i gustoće. Uz što manju masu okvira invalidskih kolica potrebno da izbjegli pojavu loma i plastičnih deformacija. Minimalno dopušteno naprezanje dobiveno je analitičkim proračunom kritičnog mjesta na okviru invalidskih kolica. S obzirom na mjesto djelovanja opterećenja pretpostavljeno je kritično mjesto provrt na području „X“ mehanizma. Iz karte odnosa čvrstoće i gustoće odvojeni su prikladni od neprikladnih materijala, a za predizbor materijala uzete su aluminijske, titanijeve i magnezijeve legure, čelici te polimerni kompoziti ojačani ugljičnim i staklenim vlaknima. Primjenom metode utjecajnosti svojstava kao optimalan materijal dobiven je polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima. Na drugom mjestu bio je čelik, a na trećem aluminijska legura. Proučavajući literaturu zaključeno je kako se danas invalidska kolica najčešće izrađuju od aluminijevih legura. Ta činjenica dovela je do promišljanja zašto ovim istraživanjem i provođenjem metoda izbora materijala nije dobiveno isto rješenje kao optimalno. U razgovoru s korisnikom, kroz malo detaljnije razmatranje svojstva materijala zaključeno je kako polimerni kompoziti s ugljičnim vlaknima, u odnosu na ostale materijale, imaju vrlo visoku cijenu. Kao osnovni nedostatak čelika, koji je dobiven kao drugi izbor, navedena je njegova velika gustoća. Uzimajući u obzir potrebe intervjuiranog korisnika, cijena i gustoća ubrajaju se kao značajni faktori koji će utjecati na konačan odabir pri kupnji ručnih sklopivih invalidskih kolica kod 65+ dobne skupine. Prema

tome, 65+ dobna skupina najvjerojatnije će se odlučiti na kupnju invalidskih kolica s okvirom izrađenim od aluminijske legure. Aluminijske legure se ne ističu niti s jednim svojim svojstvom već imaju jako dobar balans između cijene, kvalitete i mase, u odnosu na druge materijale. Kako bi se utvrdilo da model okvira napravljen od aluminijske legure i namijenjen dobnoj skupini 65+ može izdržati zadano opterećenje, provedena je numerička analiza. S obzirom na dobivenu vrijednost faktora sigurnosti zaključuje se kako je uvjet čvrstoće zadovoljen.

Ovim istraživanjem može se zaključiti kako na konačan izbor optimalnog materijala okvira invalidskih kolica uvelike utječu želje i potrebe korisnika. Prema tome ne postoji najbolji odabir materijala za neki proizvod, ali zato postoji najbolji odabir za svakog pojedinca. Stoga se pri razvoju proizvoda potrebno voditi zahtjevima korisnika kojem je i namijenjen konačan proizvod.

Provedeno istraživanje može imati veliki značaj jer su kvalitetna invalidska kolica vrlo bitna stavka u području poboljšavanja mobilnosti te u velikoj mjeri utječe na kvalitetu života 75 milijuna korisnika diljem svijeta. Bez obzira što je riječ o velikom broju korisnika, industrija invalidskih kolica ima relativno malo tržište, a uz to korisnici invalidskih kolica spadaju u skupinu koja nije financijski dovoljno spremna za najskuplje varijante rješenja.

6. LITERATURA

- [1] A. B. I. Ž. A. V. Mario Dadić, »Definiranje pojmova invaliditet i osoba s invaliditetom,« Split.
- [2] C. Ogilvie, »Finite element analysis of a wheelchair when used with a front-attached mobility add-on,« Vancouver, 2019..
- [3] [Mrežno]. Available: <https://blog.sciencemuseum.org.uk/history-of-the-wheelchair/>.
- [4] S. B. K. G. H. R. S. J. S. Sanjaikumar, »Design and analysis of wheelchair shifting technology for disabled person,« India (Namakkal, Tammilnadu), 2019.
- [5] [Mrežno]. Available: <http://www.riteh.uniri.hr/ustroj/zavodi/zae/laboratoriji/laboratorij-za-asistivnu-tehnologiju/asistivna-tehnologija/seminari/mobilnost-osobe-s-invaliditetom/elektromotorna-invalidska-kolica2/>.
- [6] [Mrežno]. Available: <https://delko.hr/products/invalidska-kolica-za-privremenu-uporabu>.
- [7] [Mrežno]. Available: <https://bauerfeind.hr/proizvod/rgk-tiga/1485>.
- [8] [Mrežno]. Available: <https://bauerfeind.hr/proizvod/quickie-easy-life-r/1468>.
- [9] [Mrežno]. Available: <https://bauerfeind.hr/proizvod/rgk-club-sport/1477>.
- [10] H. z. z. j. zdravstvo, »Izvješće o osobama s invaliditetom u Republici Hrvatskoj,« Zagreb, 2021.
- [11] N. L. D. H.-F. M. Uršulin-Trstenjak, »PRETILOST KAO FAKTOR RIZIKA ZA NASTAJANJE KARDIOVASKULARNIHKORONARNIH BOLESTI,« Varaždin, 2015..
- [12] [Mrežno]. Available: <https://www.ottobock.com/hr-hr/product/480F61>.
- [13] [Mrežno]. Available: https://www.ottobock.com/hr-hr/product/480F160~50_C.
- [14] [Mrežno]. Available: <https://www.ottobock.com/hr-hr/product/480A25>.
- [15] T. O. Per Folkesson, »Redesign of a Wheelchair Frame Side,« Karlskrona, Švedska, 1997..
- [16] P. V. F. L. N. d. S. R. M. C. C. Sauret, »Effects of user's actions on rolling resistance and wheelchair stability during handrim wheelchair propulsion in the field,« 2013..

- [17] P. U. I. G. MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA, »Pravilnik o osiguranju pristupačnosti građevina osobama s invaliditetom i smanjenom pokretljivošću,« Zagreb, 2005..
- [18] U. o. Pittsburgh, »Design Considerations,« 2017..
- [19] R. A. Félix Chénier, »Effect of Wheelchair Frame Material on Users' Mechanical Work and Transmitted Vibration,« 2014..
- [20] M.-E. U. Andrei Dumitrescu, »The golden section and product design,« Bukurešt, 2015..
- [21] A. Winter, »Mechanical principles of wheelchair design,« Massachusetts, SAD.
- [22] A. H. V. 20, Materials Selection and Design, Ohio, 1997..
- [23] d. T. Filetin, Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Zagreb, 2000..
- [24] J. Grosch, Systematik der Werkstoffauswahl, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, 1973..
- [25] F. A. A. C. J. A. Charles, Selection and use of Engineering Materials, London, 1989. .
- [26] M. M. Farag, Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design, London, 1989. .
- [27] Guide to Selecting Engineered Materials, Ohio: ASM Int. , 1990..
- [28] J. M. Walton, »The design of a frame for an all terrain, lever propelled wheelchair,« 2011..
- [29] J. X. L. T. Y. W. S. W. H. Z. S. Z. M. Y. Z. Sun, »Preparation of High-Performance Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites by Compression Resin Transfer Molding,« 2018..
- [30] »University of Cambridge,« [Mrežno]. Available: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/optimisation-biomaterials/strength_density.php. [Pokušaj pristupa 17. ožujak 2023.].
- [31] J. D. M. S. W. B. R. J. F. T. F. T. A. S. F. W. G. W. E. Luecke, Mechanical properties of structural steels, National Institute of Standards and Technology, Materials Science and Engineering Laboratory, 2005..
- [32] S. M. Amer, »Aluminium and its alloys,« 2022..

- [33] F. K. J. I. T. Filetin, Svojstva i primjena materijala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2002..
- [34] »European steel and alloy grades,« [Mrežno]. Available: <http://www.steelnumber.com/>. [Pokušaj pristupa 2. ožujak 2023.].
- [35] »MatWeb: Online Materials Information Resource,« [Mrežno]. Available: <https://www.matweb.com/>. [Pokušaj pristupa 3. ožujak 2023.].
- [36] K. R. J. Živković, Krautov strojarski priručnik, Zagreb: Sajema , 2009..