

KONSTRUKCIJA EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA ISPITIVANJE TRIBOLOŠKIH SVOJSTAVA MATERIJALA

Karaman, Angelo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:117887>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-22**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

ANGELO KARAMAN

ZAVRŠNI RAD

**KONSTRUKCIJA EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA
ISPITIVANJE TRIBOLOŠKIH SVOJSTAVA MATERIJALA**

Split, lipanj 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstruktivno strojarstvo

Predmet: Izbor materijala

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Angelo Karaman

Naslov rada: Konstrukcija edukacijske naprave za ispitivanje triboloških svojstava materijala

Mentor: Igor Gabrić, v.pred.

Split, lipanj 2022.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Izbor materijala
Nastavnik: Igor Gabrić, v.pred.

ZADATAK

Kandidat: Angelo Karaman

Zadatak: Konstrukcija edukacijske naprave za ispitivanje triboloških svojstava materijala

U radu je potrebno:

- uvodno se osvrnuti o mehanizmima trošenja i napravama za ispitivanje triboloških svojstava materijala
- opisati osnovne metode ispitivanja triboloških svojstava
- konstruirati univerzalni edukacijski uređaj (tribometar) koji objedinjuje više osnovnih metoda ispitivanja triboloških svojstava metala
- metodičkim pristupom ponuditi minimalno dvije varijante tribometra;
- prema ekonomskim i tehničkim kriterijima vrednovati varijante i odabrati najbolju;
- konstruirati uređaj (izbor materijala, proračun, dimenzioniranje, dizajn) prema odabranoj varijanti;
- primjenom CAD programa izraditi sklopni nacrt i radioničke crteže;
- iznijeti zaključke;
- navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

U ovom završnom radu opisuje se postupak metodičkog razvoja edukacijske naprave za ispitivanje triboloških svojstava materijala korištenjem više vrsta računalnih programa te ekonomskih izračuna da bi se dobio optimalan izbor materijala i opreme s ciljem što niže cijene, a da pritom ne narušavamo mogućnosti ispitivanja više različitih vrsta materijala te kvalitetu samog ispitivanja.

Ključne riječi: tribološka ispitivanja, izbor materijala, ekonomski izračun, metodički razvoj

Summary (Construction of an educational device for evaluating the tribological properties of materials)

This final paper describes the method of methodological development of educational devices for testing tribological properties of materials using several types of programs and economic calculations to obtain optimal choice of materials and equipment with the aim of lower prices, without compromising the ability to test multiple different types of materials and the quality of the test itself.

Keywords: tribological tests, material selection, economic calculation, methodological development

SADRŽAJ

Sažetak	iii
Summary	iii
1. UVOD	1
1.1. Površine	1
1.2. Trenje.....	2
1.3. Trošenje	3
1.4. Procesi trošenja.....	5
1.5. Podmazivanje.....	7
1.6. Tribometri.....	8
2. METODIČKI RAZVOJ.....	11
2.1. Lista zahtjeva i želja	11
2.2. Apstrahiranje problema	13
2.3. Rješenja parcijalnih funkcija i morfološka kutija.....	15
2.4. Tehničko vrednovanje konceptijskih varijanti.....	20
2.1. Ekonomska dobrota konceptijskih varijanti.....	22
3. IZBOR MATERIJALA	28
3.1. Metoda više ograničenja – jedan cilj	28
4. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA I PRORAČUN.....	39
4.1. Proračun nosive grede	39
4.2. Proračun potrebne snage elektromotora	44
5. ZAKLJUČAK	46
Literatura	47
Prilozi	48

Popis slika

SLIKA 1.1 – OSNOVNE VRSTE ODSUPANJA POVRŠINE[1]	1
SLIKA 1.2 – REFERENTNA DULJINA PROFILA L , SREDNJE ARITMETIČKO ODSUPANJE PROFILA R_a , SREDNJE KVADRATNO ODSUPANJE PROFILA R_q [1]	2
SLIKA 1.3 – SILA TRENJA [2]	2
SLIKA 1.4 TRENJE KOTRLJANJA [1]	3
SLIKA 1.5 - ABRAZIJA [1]	3
SLIKA 1.6 - ADHEZIJA [1]	4
SLIKA 1.7 - UMOR POVRŠINE [1]	4
SLIKA 1.8 - TRIBOKOROZIJA [1]	4
SLIKA 1.9 - OPĆENITI OBLIK PROCESA TROŠENJA [1]	5
SLIKA 1.10 – SHEMA PROCESA KLIZNOG TROŠENJA [1]	5
SLIKA 1.11 – SHEMA PROCESA KLIZNOG TROŠENJA [1]	5
SLIKA 1.12 – SHEMA PROCESA UDARNOG TROŠENJA [1]	6
SLIKA 1.13 – SHEMA PROCESA IZJEDANJA [1]	6
SLIKA 1.14 – SHEMA PROCESA ABRAZIJSKOG TROŠENJA [1]	6
SLIKA 1.15 – SHEMA PROCESA EROZIJE ČESTICAMA [1]	6
SLIKA 1.16 – SHEMA PROCESA EROZIJE KAPLJEVINOM [1]	7
SLIKA 1.17 – SHEMA PROCESA EROZIJE ČESTICAMA [1]	7
SLIKA 1.18 OSNOVNE METODE ISPITIVANJA [1]	9
SLIKA 1.19 – OSNOVNI DIJELOVI TRIBOMETRA[1]	10
SLIKA 2.1 – TROŠENJE [3]	13
SLIKA 2.2 FUNKCIONALNA STRUKTURA EDUKACIJSKOG UREĐAJA ZA TRIBOLOŠKO ISPITIVANJE	14
SLIKA 2.3 – SKICA PRVE VARIJANTE EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA	17
SLIKA 2.5 – SKICA DRUGE VARIJANTE EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA	18
SLIKA 2.6 – SKICA TREĆE VARIJANTE EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA	19
SLIKA 2.7 SLIKA OCJENA VREDNOVANJA KONCEPCIJSKIH VARIJANTI	20
SLIKA 2.8 – GRAFIČKI PRIKAZ UKUPNE DOBROTE VARIJANTI	27
SLIKA 3.1 – GREDA OPTEREČENA NA SAVIJANJE [3]	29
SLIKA 3.2 – ODABIR IZ TABLICA [3]	30
SLIKA 3.3– IZBOR BAZE MATERIJALA[4]	34
SLIKA 3.4– GENERIRANI DIJAGRAM SVOJSTAVA MATERIJALA ČIJE SU OSI INDEKSI MATERIJALA M_1, M_2 [4]	34
SLIKA 3.5– GENERIRANI DIJAGRAM SVOJSTAVA MATERIJALA S NAJBOLJIM MATERIJALIMA [4]	35
SLIKA 3.6– POLOŽAJ NOVOG MATERIJALA ASTM A36 U GRAFU [4]	36
SLIKA 3.7– ISJEČAK IZ KATALOGA S DOSTUPNIM MATERIJALIMA [5]	37
SLIKA 4.1– GREDA NA UREĐAJU [6]	39
SLIKA 4.2 PRIKAZ GREDE [7]	40

SLIKA 4.3 PRIKAZ GREDE SA SILAMA, REAKCIJAMA U OSLONCIMA TE MAKSIMALNIM MOMENTOM [7].....	41
SLIKA 4.4 PARAMETRI UPISANI U PROGRAM MD SOLIDS [7]	42
SLIKA 4.6 REZULTATI PRORAČUNA POVRŠINE POPREČNOG PRESJEKA MD SOLIDS [7]	42
SLIKA 4.7 PRIKAZ GREDE SA MAKSIMALNIM PROGIBOM I MAKSIMALNIM NAGIBOM [7].....	43
SLIKA 4.8– SLIKA PROIZVODA TVRTKE SIEMENS [9]	45

Popis tablica

TABLICA 2.1 TABLICA S LISTOM ZAHTJEVA I ŽELJA	11
TABLICA 2.2 RJEŠENJA PARCIJALNIH FUNKCIJA I MORFOLOŠKA KUTIJA	15
TABLICA 2.3 VREDNOVANJE KONCEPCIJSKIH VARIJANTI	21
TABLICA 2.4 TABLICA TROŠKOVA PRVE VARIJANTE	23
TABLICA 2.5 TABLICA TROŠKOVA DRUGE VARIJANTE	24
TABLICA 2.6 TABLICA TROŠKOVA TREĆE VARIJANTE	25
TABLICA 3.1 TABLICA SA ZAHTJEVIMA DIZAJNA	28
TABLICA 3.2 TABLICA SA ZAHTJEVIMA DIZAJNA ZA PRVO OGRANIČENJE.....	29
TABLICA 3.3 TABLICA SA ZAHTJEVIMA DIZAJNA ZA DRUGO OGRANIČENJE	30
TABLICA 3.4 IZBOR PET NAJPOVOLJNIJIH MATERIJALA	35
TABLICA 3.5 KARAKTERISTIKE MATERIJALA ASTM A36.....	36
TABLICA 4.1 ISJEČAK IZ OPISA PROIZVODA TVRTKE SIEMENS [9]	45

1. UVOD

Tribologija je znanost čiji je glavni zadatak ispitivanje i proučavanje trenja i trošenja.

Glavna područja u kojima se koristi su podmazivanje, obradba materijala, konstrukcije te materijali.

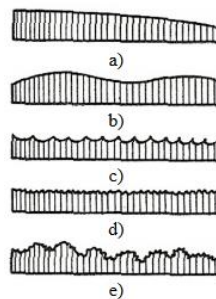
Tribološke mjere se mogu podijeliti na četiri dijela, odnosno izbor materijala, zaštitu površine, uhodavanje površine te podmazivanje.

Sve više je u upotrebi primjena smanjenja trenja zbog dužeg vijeka trajanja sustava, veće efikasnosti, manjih troškova, veće pouzdanosti i sigurnosti, očuvanja energije i manje otpada.

1.1. Površine

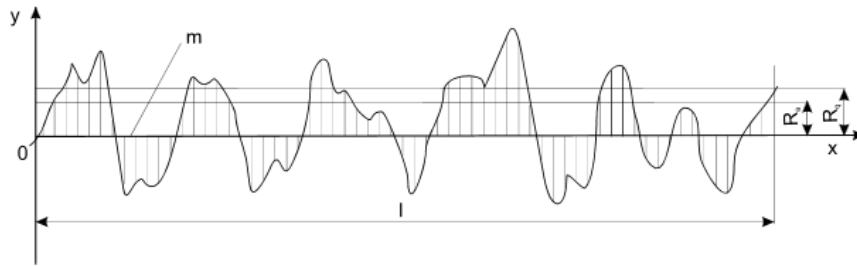
Površine svih krutih materijala za izradu strojnih elemenata su po pitanju geometrije neravne ili hrapave. Te se razlikuje nekoliko vrsta odstupanja površine kako je prikazano na slici 1.1.

Makroneravnine odnosno neparalelnost površine (Slika 1.1.a) te valovitost (Slika 1.1.b), Mikroneravnine odnosno izbrazdanost (Slika 1.1.c) te hrapavost (slika 1.1.d), nanoneravnine zajedno daju rezultantu površinu (slika 1.1.e)



Slika 1.1 – Osnovne vrste odstupanja površine[1]

Površina se prikazuje u dvije dimenzije odnosno kao profil hrapavosti p što je presjek s ravninom koja je okomita na površinu koja se promatra, a njega se gleda na neku duljinu l (Slika 1.2) i određuje po tablicama.



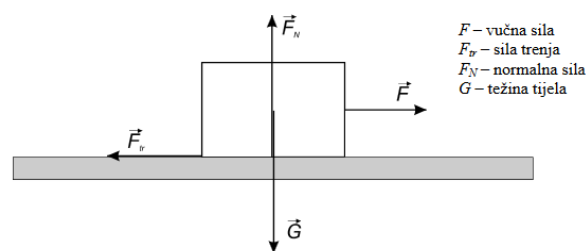
Slika 1.2 – Referentna duljina profila l , srednje aritmetičko odstupanje profila Ra , srednje kvadratno odstupanje profila Rq [1]

1.2. Trenje

Da bi se ostvarilo gibanje, potrebno je prvo savladati silu trenja. Trenje je sila odnosno otpor koji je suprotstavljen relativnom gibanju nekog krutog tijela koje je u dodiru. Ono je paralelno s plohamu u dodiru te je suprotnog smjena u odnosu na relativno gibanje. Trenje djeluje tangencijalno na granici dvaju tijela kada se jedno od tih tijela kreće pod utjecajem vanjske sile.

Trenje se može podijeliti na više vrsta. Prva podjela je podjela prema *agregatnom stanju* tijela (trenje između čvrstih površina i trenje između fluida i čvrstog tijela), druga podjela je prema *podmazivanju* (suho te trenje uz podmazivanje) te *trenje uslijed pokretanja tijela* (statičko i dinamičko).

Ako pokušamo pomaknuti tijelo, a sila F je manja od sile trenja, tada tijelo miruje kao što je opisano na (Slika 1.3 i 1.4).



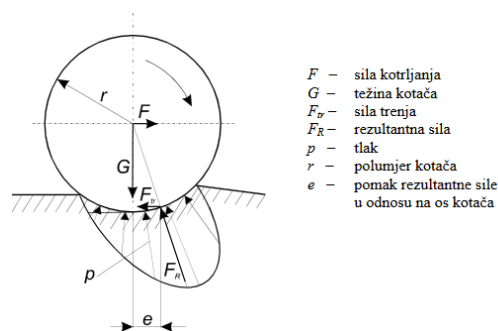
Slika 1.3 – Sila trenja [2]

Za trenje postoje posebni zakoni i oni govore kako : a) trenje ne ovisi o površini koja je u kontaktu između krutih tijela, b) je proporcionalno normalnoj sili, c) za slučaj kinetičkog trenja, ono je neovisno o brzini klizanja.

Postoji faktor koji povezuje normalnu i silu trenja i zove se koeficijent trenja i on je omjer sile trenja i normalne sile.

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} \quad (1.1)$$

Također postoji trenje kotrljanja koje je otpor koji se javlja prilikom kotrljanja kružnih oblika na deformabilnoj površini. Za njega vrijedi da je manje u odnosu na trenje klizanja i prikazano je na slici 1.2.3.



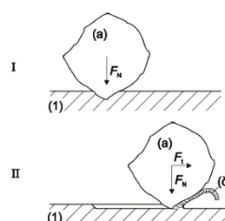
Slika 1.4 Trenje kotrljanja [1]

1.3. Trošenje

Trošenje je gubitak materijala koji se događa postepeno uslijed dodira dvaju tijela, tijela s fluidom ili nekim drugim česticama

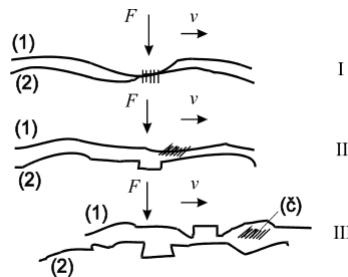
Postoje četiri mehanizma trošenja i to:

- a) Abrazija – tvrdim česticama ili izbočinama dolazi do istiskivanja materijala i to u dvije faze od kojih je I faza gdje pod utjecajem normalne sile dolazi do prodiranja u materijal te II faza gdje tangencijalna sila istiskuje materijal (Slika 1.5)



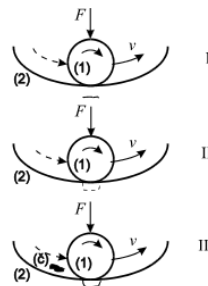
Slika 1.5 - Abrazija [1]

- b) Adhezija – kroz tri faze pri relativnom gibanju dolazi do prijelaza između kliznih ploha materijala. Faza I prikazuje nastanak adhezijskog spoja na dodiru, Faza II raskidanje spoja gdje jedan komad ostaje na jednom od parova te Faza III u kojoj se ta čestica u potpunosti otkida kao što je prikazano na Slici 1.6



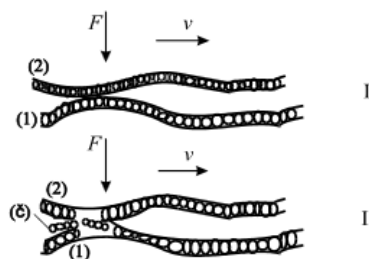
Slika 1.6 - Adhezija [1]

- c) Umor površine – kroz tri faze dolazi do odvajanja čestica zbog promjena napreznja. U prvoj fazi (Faza I) se stvara mikropukotina, u drugoj (Faza II) ona napreduje dok u trećoj (Faza III) ona ispada u potpunosti prikazano na slici 1.7



Slika 1.7 - Umor površine [1]

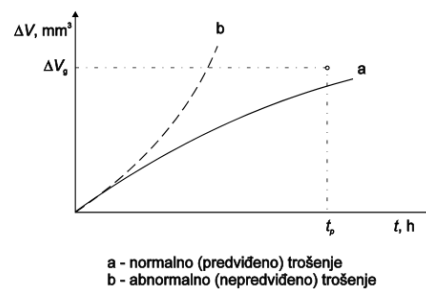
- d) Tribokorozija do koje dolazi zbog kemijskih reakcija s okolišem u dvije faze. U prvoj fazi dolazi do pojave , a u drugoj do razaranja sloja korozije.(Slika 1.8)



Slika 1.8 - Tribokorozija [1]

1.4. Procesi trošenja

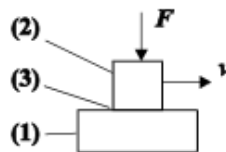
Svi procesi trošenja se sastoje od bar dva mehanizma koji djeluju istovremeno, a postoje i slučajevi gdje je više mehanizama i sve to u ovisnosti o relativnom gibanju, uvjetima rada te vrsti samog tribo-sustava. Korištenjem potrebnih triboloških mjera treba postići da sustav funkcionira kroz režim predviđenog trošenja (Slika 1.9)



Slika 1.9 - Općeniti oblik procesa trošenja [1]

Ovisno o vrsti elemenata, dodira, gibanja te opterećenju može se razlikovati :

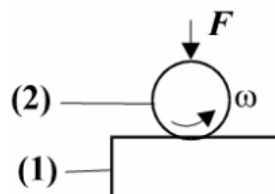
a) Klizno trošenje



Slika 1.10 – Shema procesa kliznog trošenja [1]

(1) i (2) – funkcionalni dijelovi , (3) – mazivo, F – sila, v – brzina

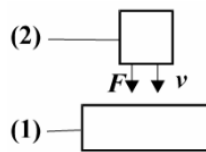
b) Kotrljajuće trošenje



Slika 1.11 – Shema procesa kliznog trošenja [1]

(1) i (2) - funkcionalni dijelovi, F – sila, ω - kutna brzina

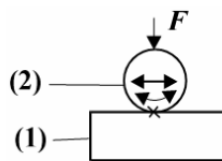
c) Udarno trošenje



Slika 1.12 – Shema procesa udarnog trošenja [1]

(1) i (2) - funkcionalni dijelovi, F – sila, v - kutna brzina

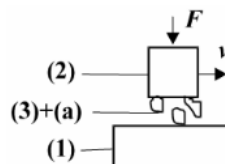
d) Fretting trošenje nastaje uslijed vibracije između dvije naizgled tvrde površine.



Slika 1.13 – Shema procesa izjedanja [1]

(1) i (2) - funkcionalni dijelovi, F – sila

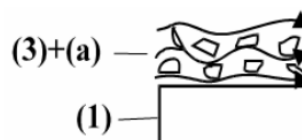
e) Abrazija



Slika 1.14 – Shema procesa abrazijskog trošenja [1]

(1) i (2) - funkcionalni dijelovi, (3) - mazivo, (a) – abraziv, F – sila, v – brzina

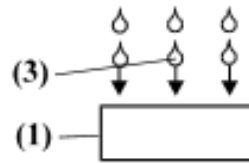
f) Erozijska česticama – gubitak materijala uslijed relativnog gibanja nekog fluida unutar kojeg se nalaze krute čestice.



Slika 1.15 – Shema procesa erozije česticama [1]

(1) - funkcionalni dio, (3) – fluid, (a) – čestica

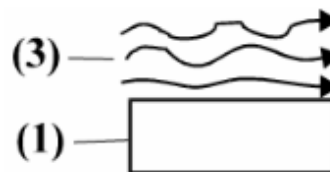
g) Erozijska kapljevina – trošenje uzrokovano strujanjem kapljevine ili plina s kapljicama



Slika 1.16 – Shema procesa erozije kapljevina [1]

(1) - funkcionalni dio, (3) – kapljice

h) Kavitacija – trošenje uslijed strujanja kapljevina i naglo implodiranje mjehurića



Slika 1.17 – Shema procesa erozije česticama [1]

(1) - funkcionalni dio, (3) - fluid

1.5. Podmazivanje

Svrha podmazivanja smanjenje trenja te samim tim i trošenje materijala. Provodi se tako da se dodirne površine odvoje slojem maziva. Razlikuje se nekoliko vrsta pomazivanja: granično (nedovoljno debeli sloj), mješovito (potpuni, ali djelomično razoren sloj), potpuno podmazivanje.

1.5.1. Mazivo

Mazivo je zajednički naziv za ulja, masti ili neko drugo sredstvo između površina u gibanju.

1.5.2. Praćenje procesa trošenja analizom maziva iz tribosustava

Praćenje na temelju dimenzija i količine tijela u mazivu zbog procjene stanja sustava

Metode analize maziva su mjerenje količine maziva, spektrografska analiza ulja, magnetni detektori čestica, radioaktivne metode, ferografija, indeks intenzivnosti trošenja I_t .

1.6. Tribometri

1.6.1. Opis

Tribometri su uređaji koji se koriste za ispitivanje triboloških svojstava materijala odnosno uređaji koji mjere koeficijente trenja, sile trenja te volumen trošenja između površina.

Izumljen je u 18. stoljeću od strane Pieter van Musschenbroeka.

Da bi tribometar mogao zadovoljavati svoju zadaću trebao bi imati barem dvije osi gibanja. Svaka nova os na postojeće dvije je dodatna mogućnost tog uređaja.

Od dvije potrebne osi, jedna bi trebala biti linearno gibanje normalne sile koja se nalazi u smjeru te osi. Takvo gibanje stvara silu pritiska na ispitni uzorak. Druga os treba biti ili kružno ili pravocrtno gibanje. Ako je drugo gibanje pravocrtno, tada su i sila trenja i smjer gibanja uzduž te iste osi, a ako je druga os os kružnog gibanja, trenje će biti okomito na pravac u osi gibanja. Da bi koncept bio funkcionalan, potrebno je prilagoditi os normalne sile osi trenja, jer je sila trenja okomita na normalnu silu.

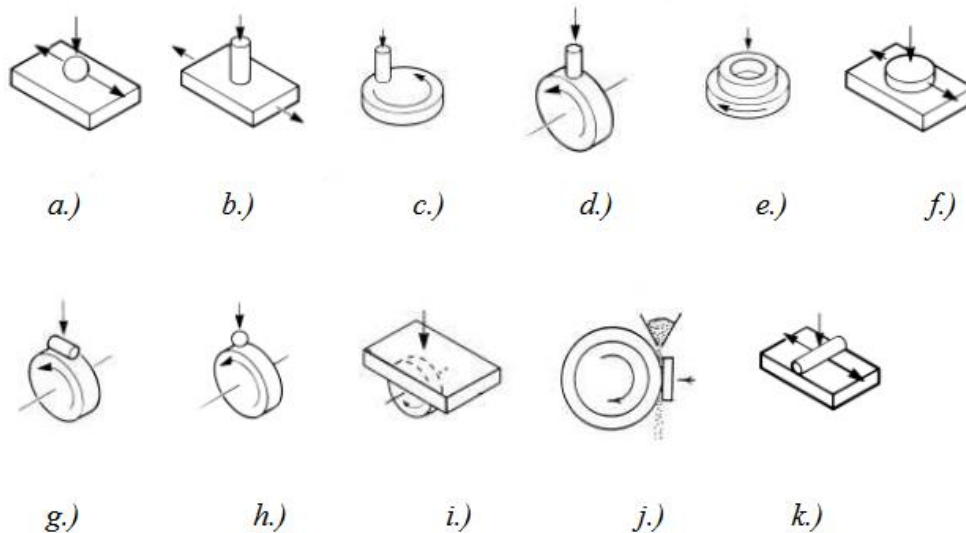
1.6.2. Vrste tribometara i metode ispitivanja

Statički tribometar je jednostavni stroj koji najčešće ima rotacijsku os pogonjenu asinkronim elektromotorom s potencijetrom te polugom na koju se učvršćuje kuglica, klin ili prsten. S jedne strane poluge se spaja dinamometar ili u nekim slučajevima vaga kojima je zadaća da mjere promjene normalne sile za vrijeme djelovanja uređaja, dok druga strana poluge mora biti u potpunosti pričvršćena. Nakon par mjerenja se uzima prosječna vrijednost.

Dinamički tribometar je uređaj koji mjeri ne samo promjene trenja između dva uzorka već i druge parametre koji utječu na silu, te uz pomoć regulacijskih uređaja smanjuje greške ispitivanja na sam minimum. Tim načinom se prati iznos sile trenja u svakom trenutku i postoji mogućnost praćenja na računalo. Uz pomoć takvog načina možemo vršiti i obrnuta ispitivanja, gdje se postavlja sila trenja te se zatim prati nešto poput temperature odnosno tarnih obloga. S obzirom

da fleksibilnost, imaju mogućnost drugih ispitivanja koji ne moraju nužno biti vezani za trenje i to čvrstoće i tvrdoće materijala, sila rezanja kod odvajanja čestica i još mnogo drugih stvari.

Vrste i metode ispitivanja tribometrom , najčešće dijelimo ovisno o načinu ispitivanja s istim, a to su (Slika 1.18):



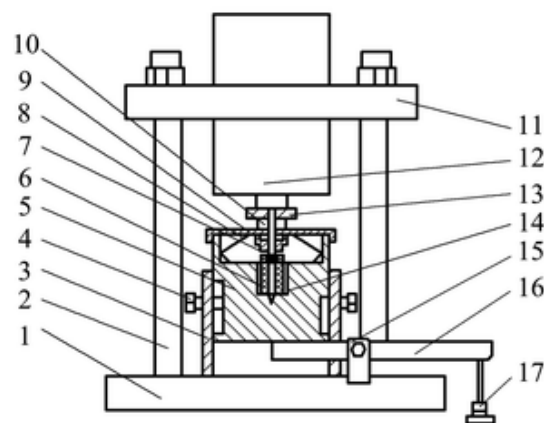
Slika 1.18 Osnovne metode ispitivanja [1]

- a) Kuglica na ploči – glavno gibanje koje je pravocrtno vrši kuglica gibajući se lijevo – desno po ploči.
- b) Klin na ploči - funkcionira jednako kao i metoda s kuglicom uz razliku što je umjesto kuglice postavljen valjčić promjera manjeg od svoje dužine.
- c) Klin na disku - klin pritišće čeonu podlogu diska koji se rotira, odnosno vrši glavno rotacijsko gibanje.
- d) Klin na prstenu – glavno rotacijsko gibanje obavlja prsten, a na njegovu bočnu površinu se pritišće klin.
- e) Prsten na disku - glavno gibanje obavlja disk dok je na njemu čeonu postavljen kružni prsten .
- f) Blok na ploči – blok izvodi glavno pravocrtno gibanje dok se čeonu pritišće na ploču.
- g) Klin na prstenu obodno- obodnim dijelom se pritišće na obod prstena koji vrši glavno gibanje (kružno), a osi su im okomite te se mimoilaze .

- h) Kuglica na prstenu - Kao kod metode prsten obodno, se umjesto klina koristi kuglica.
- i) Ploče na prstenu - glavno gibanje (kružno) izvodi prsten, a ploča se pritišće na obod.
- j) Ispitivanje trošenja uz dodatni abraziv – prilikom vrtnje diska na njegov rub se doda abraziv koji se pritišće pločom.
- k) Valjak na ploči - glavno gibanje koje je pravocrtno izvodi valjak koji se valja po obodu i pritišće na površinu ploče .

1.6.3. Osnovni dijelovi tribometra

S ciljem izrade tribometra i odabira materijala za ključne dijelove, potrebno je i samo poznavanje istih prikazanih na slici 1.19.



Slika 1.19 – Osnovni dijelovi tribometra[1]

1 - baza; 2 - stup; 3 - ploča baze ležaja; 4 – osigurač; 5 - baza ležaja; 6 – prigušivač; 7 – ležaj; 8 – opruga; 9 – poklopac; 10 - ispitni uzorak; 11 - poklopac glave; 12 - električni motor; 13 - glava igle; 14 - pomoćna osovina; 15 – oslonac; 16 - poluga za opterećivanje; 17 – opterećenje

2. METODIČKI RAZVOJ

2.1. Lista zahtjeva i želja

U metodičkom razvoju proizvoda, sami razvoj proizvoda započinje izradom liste zahtjeva koje taj proizvod treba imati, te želja koje bi bilo poželjno da proizvod ima, ali nisu nužne.

Želje i zahtjevi su prikazani u Tablici 2.1.

Tablica 2.1 Tablica s listom zahtjeva i želja

REDNI BROJ	Z/Ž	OPIS	DATUM	ODGOVORNA OSOBA
		1. Geometrija		
1.1	Z	Maksimalna dimenzija 800x800x800 mm		
1.2	Z	Maksimalna veličina ispitnog uzorka Ø5 -30 mm, L = 10 -100 mm		
1.3	Z	Maksimalna težina uređaja 50 kg		
	Ž	Maksimalna težina 30 kg		
		2. Kinematika		
2.1	Z	Kombinacija kružno gibanje – pravocrtno gibanje		
2.2	Z	Ispitna ploča se rotira – Klin na disku (Slika 1.18c)		
2.3	Z	Ispitni uzorak je fiksiran		
2.4	Ž	Ispitna ploča je fiksirana – Ploče na prstenu		
2.5	Ž	Samo pravocrtno gibanje – Ispitivanje udarnog trošenja		
		3. Sile		
3.1	Z	Vertikalna sila - promjenjiva		
		4. Energija		
4.1	Z	Električni pogon		

4.2	Z	Priključak energije: 230 V EU		
4.3	Ž	Mogućnost održavanja određene temperature u lokaciji ispitnog prostora		
		5. Materijal		
5.1	Z	Kruti materijali		
5.2	Z	Dinamička izdržljivost		
5.3	Ž	Otpornost materijala na koroziju		
5.4	Z	Otpornost na koroziju		
		6. Ergonomija		
6.1	Z	Jednostavan oblik		
6.2	Z	Optimalni položaj po potrebi korisnika		
6.3	Z	Preglednost		
6.4	Z	Jednostavno rukovanje		
		7. Montaža		
7.1	Z	Probni rad, puštanje u pogon		
7.2	Ž	Mogućnost nadogradnje uređaja		
		8. Proizvodnja		
8.1	Z	Što veći broj standardnih dijelova		
		9. Upotreba-eksploatacija		
9.2	Z	Laboratorijska temperature (10 do 50°C)		
		10. Recikliranje		
10.1	Z	Mogućnost recikliranja dijelova		
		11. Rokovi		
11.1	Z	Rok do 19.6.2022		
		12. Troškovi		
12.1	Z	Maksimalna cijena 15000 HRK		

2.2. Apstrahiranje problema

Izraditi edukacijsku napravu za ispitivanje triboloških svojstava materijala.

Poblje će biti označeno kroz funkcionalnu strukturu te morfološku kutiju s rješenjima parcijalnih funkcija u sljedećim poglavljima.

Trošenje je gubitak materijala uslijed kretanja dva tijela, jednog preko drugog. Brzina ili Stupanj trošenja (eng. Wear rate) označava se s W i mjeri u m^2 i u korelaciji je sa putom klizanja (eng. Sliding distance).

$$W = \frac{\text{Volumen potrošenog materijala s kontaktne površine}}{\text{put klizanja}}$$

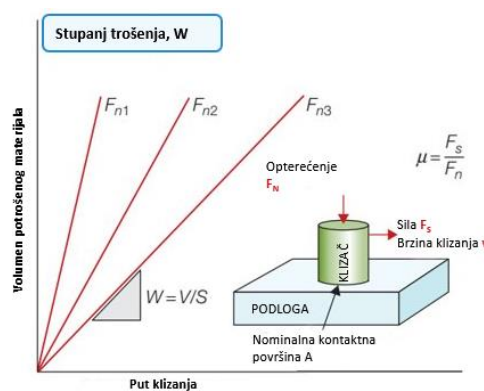
Također postoji Specifični stupanj trošenja, koji označava potrošenost po jedinici površine

$$\Omega = \frac{\text{Istrošena debljina kontaktne površine}}{\text{put klizanja}} = \frac{W}{A}$$

Otpornost površine na trošenje karakterizira se pomoću Archardove konstante trošenja K_A koja se prikazuje u MPa^{-1} . Konstanta je definirana jednađbom:

$$\Omega = \frac{W}{A} = K_A \times \frac{F_N}{A} = K_A \times p$$

U jednađbi A predstavlja kontaktnu površinu, a $p = F_N / A$, normalni tlak između predmeta i podloge. Brzina trošenja i duljina klizanja su poblje označeni na Slici 2.1 .



Slika 2.1 – Trošenje [3]

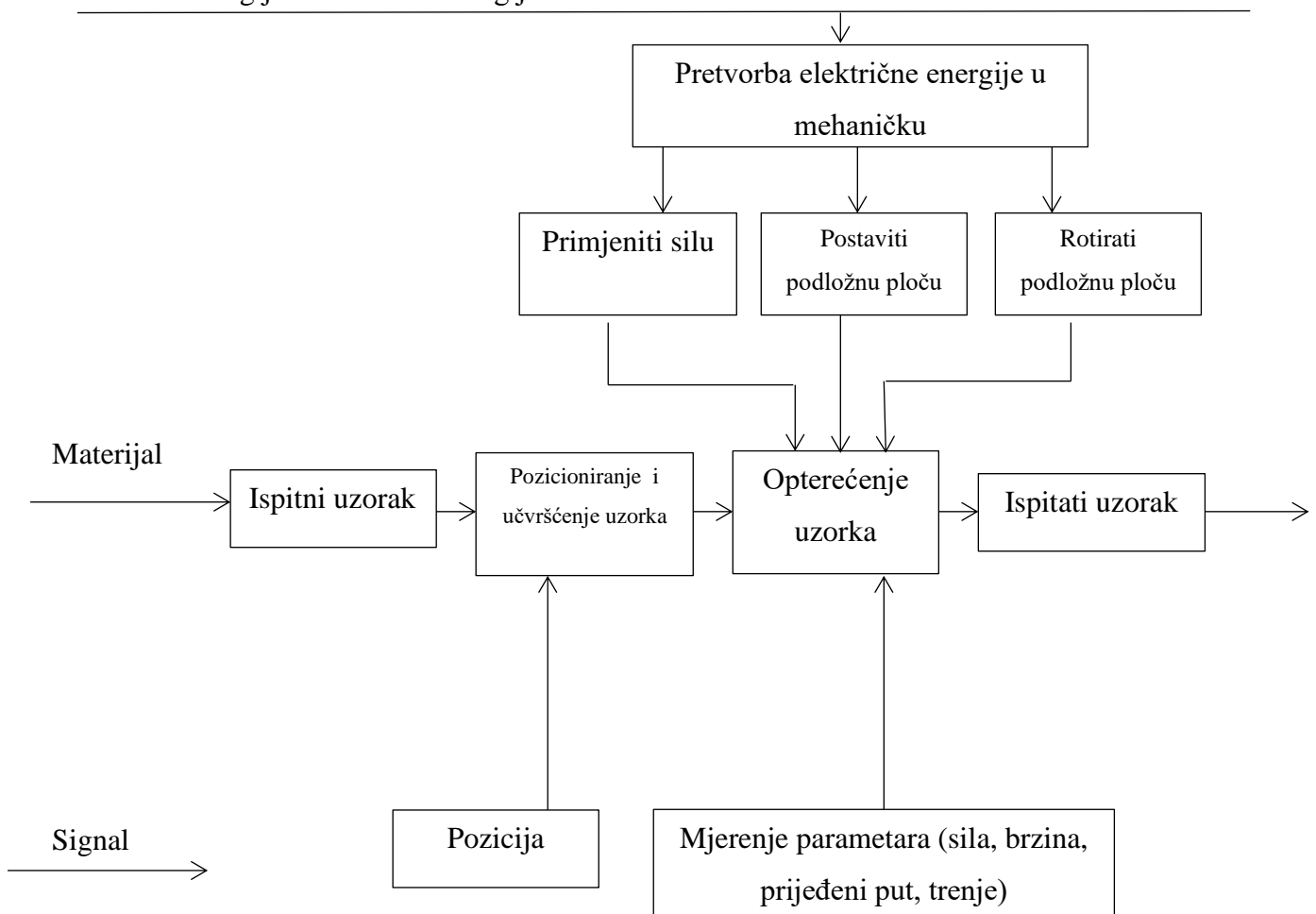
2.2.1. Funkcionalna struktura

Kod novih konstrukcija još nisu poznate parcijalne funkcije i veza između istih koja mora biti logična. Da bi dobili funkcionalnu strukturu, potrebno je postaviti glavni tok, sporedni tok te iste postepeno rastavljati na manje složene funkcije.

Kod ovog uređaja, funkcionalna struktura se razlaže na glavni tok koji je električna energija koja služi za pretvorbu u mehaničku. Mehanička energija se koristi na tri koraka rada uređaja, i to primjena sile, postavljanje te rotiranje podložne ploče. Tri koraka glavnog toka se presijecaju sa materijalom, kod opterećenja uzorka. Povratni signal procesa su pozicija uzorka te mjerenje parametara ispitivanja.

Funkcionalna struktura za tribometar je prikazana na slici 2.1 te prikazuje princip funkcioniranja iste.

Glavni tok energije – električna energija



Slika 2.2 Funkcionalna struktura edukacijskog uređaja za tribološko ispitivanje

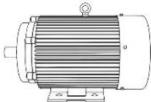

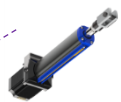






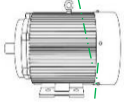

2.3. Rješenja parcijalnih funkcija i morfološka kutija

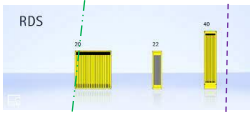



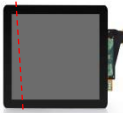
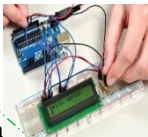




Za konkretna rješenja potrebno je raščlaniti parcijalne funkcije i povezati ih u logičan redoslijed.

Sami metodički razvoj se obavlja uz pomoć morfološke kutije. To je tablica koja sadrži parcijalne funkcije u redcima, a rješenja tih funkcija u stupcima.

Za ovaj projekt, rješenja su prikazana u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Rješenja parcijalnih funkcija i morfološka kutija

Redni broj	Parcijalne funkcije	1	2	3
		1	2	3
1	<i>Pretvorba energije</i>	Elektromotor 	Kompresor 	Stepper motor 
2	<i>Donošenje uzorka</i>	Ručno 		
3	<i>Podešavanje uzorka</i>	Samopozicioniranje 	Ručno 	
4	<i>Primijeniti silu</i>	Utezi 	Pneumatski cilindar 	Trapezna navojna šipka 
5	<i>Pokretanje radne ploče</i>	Elektromotor 		Pneumatski motor 

6	Mjeriti silu	Teznometrijske trakice 	Predodređena utezima 	Senzor pritiska 
7	Mjeriti parametre	Termometar 		
8	Međurezultati i rezultati mjerenja	Digitalni zaslon 	Mikrokontroler + LCD zaslon 	
9	Inspekcija površine	Digitalna kamera s mogućnosti uvećanja 	Povećalo 	Mikroskop 
10	Mjerenje gubitaka mase ispitnog uzorka			

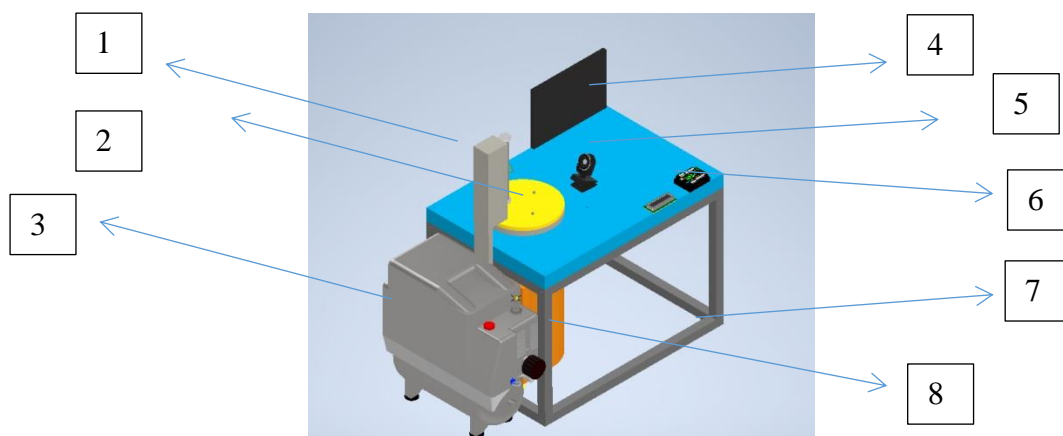
2.3.1. Opis Varijanti

Prva i druga varijanta imaju mogućnost ispitivanja translacijskim relativnim gibanjem tribološkog para, te se u suštini razlikuju vrstom pokretanja radne ploče / ispitnog uzorka.

Treća varijanta je koncipirana da ispitivanje bude rotacijskim gibanjem.

Prva varijanta

Prva varijanta projekta je koncipirana na način da je uređaj pogonjen kompresorom. Na sam uređaj se uzorak ispitivanje donosi ručno. Samu prilagodbu odnosno podešavanje uzorka vršimo ručnim stezanjem. Silu pritiska na uzorak vršimo pneumatskim cilindrom. Pokretanje uzorka i radne ploče se također obavlja pneumatski, odnosno pneumatskim motorom za rotacijsko. Silu mjerimo senzorom pritiska, dok ostale parametre mjeri senzor okretaja. Rezultate mjerenja prikazuje na digitalnom zaslonu. Također ima mogućnost inspekcije površine uz pomoć digitalne kamere s mogućnosti uvećanja koja također prikazuje površinu na zaslonu. I nakon toga se vrši mjerenje mase uzorka, da bi se usporedila masa prije i nakon trošenja, te sami gubitci.

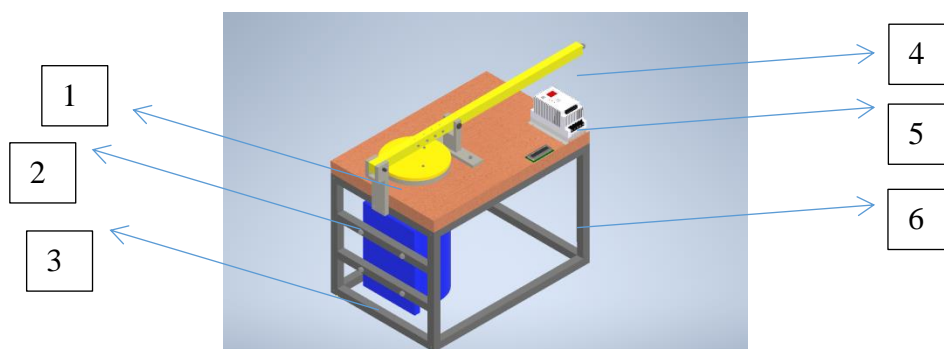


Slika 2.3 – Skica prve varijante edukacijske naprave za ...

1 - Pneumatski cilindar	5 – Digitalna kamera
2 – Rotirajući disk	6 – Upravljačka jedinica
3 – Kompresor i pripremna jedinica	7 – Postolje stola
4- LCD Display	8 – Pneumatski motor

Druga varijanta

Druga varijanta je koncipirana tako da se pretvorba energije odnosno pogon uređaja vrši uz pomoć elektromotora. Uzorak, kao kod prethodne varijante, se učvršćuje ručno u steznu napravu. Stezna naprava ima mogućnost samopozicioniranja uzorka. Pritezanje se vrši vijcima. Primjena sile za ispitivanje se vrši uz pomoć utega unaprijed određene mase. Mjerenje broja okretaja se vrši uz pomoć Hallovog senzora koji registrira prolazak magneta ispred senzora. Brzina se regulira ili pomicanjem ispitnog uzorka u odnosu na centar rotacije ili regulacijom okretaja elektromotora pomoću frekvencijskog pretvarača. Kontrola pretvarača, mjerenje broja okretaja te ostali parametri poput realne temperature u prostoru upravljani uz pomoć mikrokontrolera i prikazani na LCD zaslonu. Ispitivana površina se promatra korištenjem mikroskopa, a gubitak mase se utvrđuje laboratorijskom vagom.



Slika 2.5 – Skica druge varijante edukacijske naprave za ...

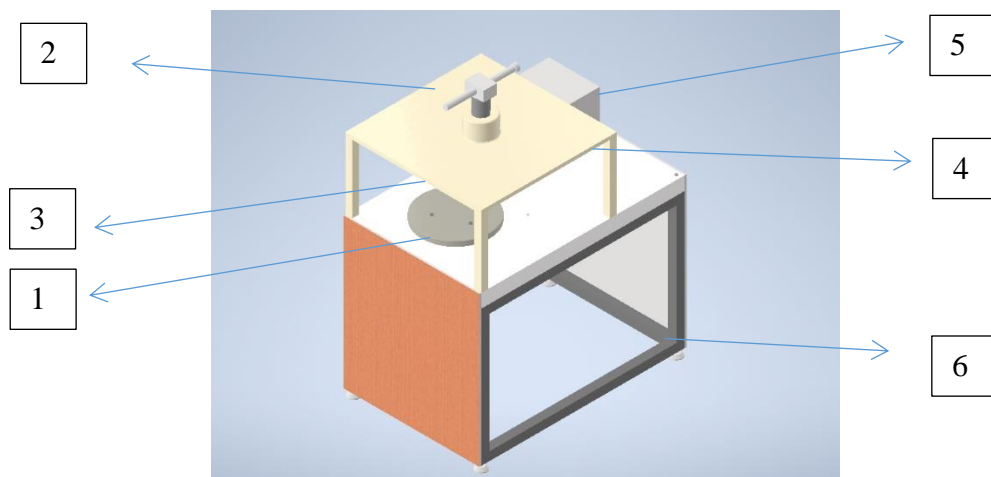
1 – Rotirajući disk	4 - Glavna šipka
2 – Nosač šipke	5 – Upravljačka jedinica
3 – Elektromotor	6 – Postolje stola

Treća varijanta

Treća varijanta je koncipirana tako da je pretvorba energije izvršena uz pomoć koračnog motora.

Kod ove varijante glavno gibanje, odnosno rotaciju vrši sami ispitni uzorak, dok se sila pritiska regulira uz pomoć trapezne navojne šipke. Silu se mjeri korištenjem tenzometrijskih traka. Neregulirani parametar je temperatura koja se mjeri digitalnim termometrom.

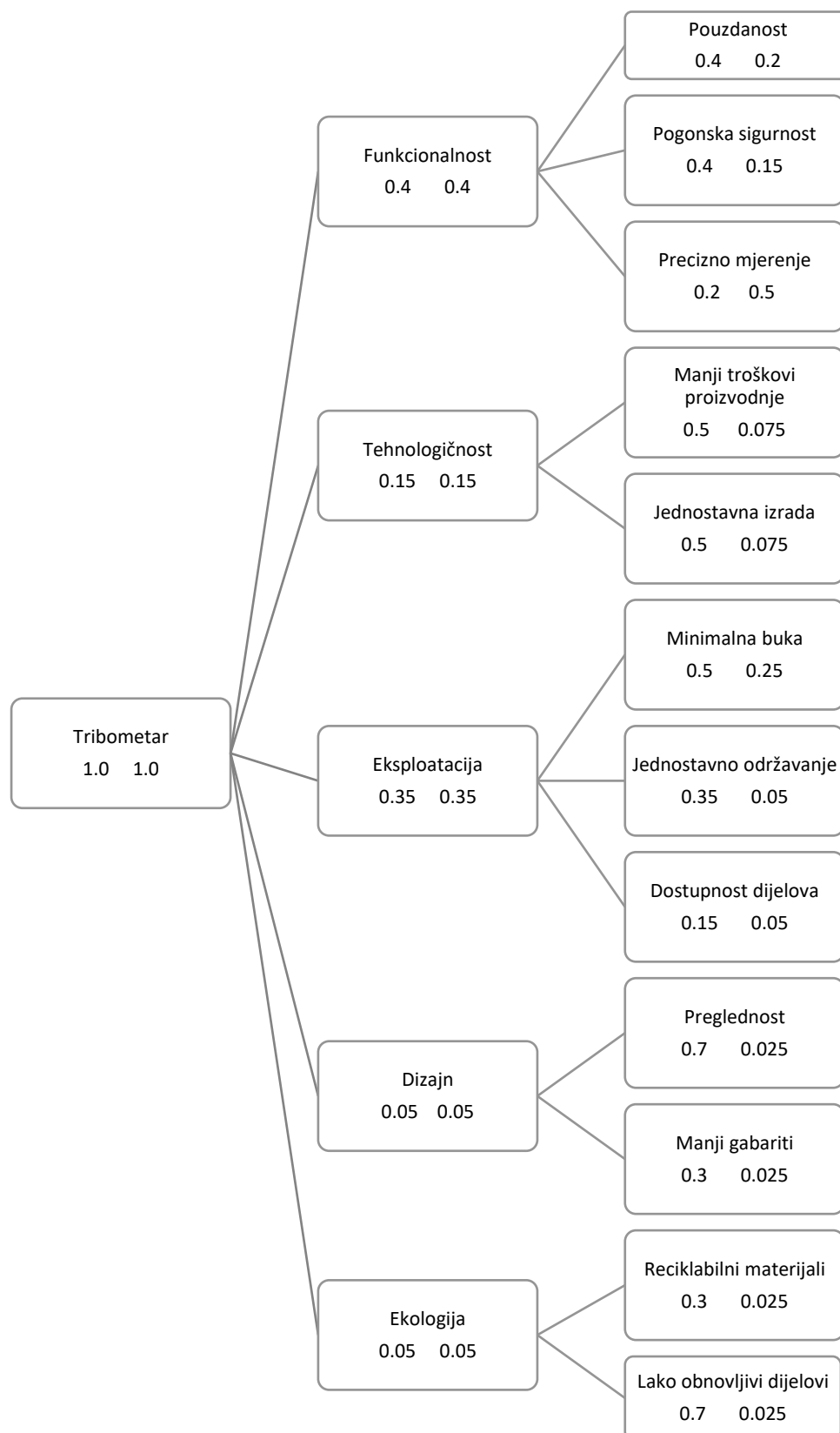
Parametri se prikazuju na digitalnom zaslonu, a inspekcija površine, kao i kod prve varijante, se vrši uz pomoć digitalne kamere te mjerenja gubitak mase uz pomoć digitalne vage.



Slika 2.6 – Skica treće varijante edukacijske naprave za ...

1 – Ispitni disk	4 – Postolje i vodilica elektromotora
2 – Zatezna trapezna šipka	5 – Upravljačka jedinica
3 – Elektromotor	6 – Postolje stola

2.4. Tehničko vrednovanje konceptijskih varijanti



Slika 2.7 Slika ocjena vrednovanja konceptijskih varijanti

Tablica 2.3 Vrednovanje konceptijskih varijanti

KRITERIJ VREDNOVANJA				VELIČINA SVOJSTAVA		VARIJANTA 1.			VARIJANTA 2.			VARIJANTA 3.		
Br.			Faktor težinskog značaja G_i		Jedinica mjere	Svojtvo E_{i1}	Ocjena W_{i1}	Vagana ocjena $W_{i1}G_i$	Svojtvo E_{i2}	Ocjena W_{i2}	Vagana ocjena $W_{i2}G_i$	Svojtvo E_{i3}	Ocjena W_{i3}	Vagana ocjena $W_{i3}G_i$
1	Funkcionalnost	Pouzdanost	0.16	Razina pouzdanosti	n/a	Srednje V	7	1,12	Visoka	9	1,44	Visoka	8	1,28
2		Pogonska sigurnost	0.16	Razina pogonske sigurnosti	n/a	Visoka	8	1,28	Srednje V	7	1,12	Srednje V	7	1,12
3		Precizno mjerenje	0.08	Dimenzija	μ	Visoka	8	0,64	Visoka	8	0,64	Visoka	8	0,64
4	Tehnološkičnost	Manji troškovi proizvodnje	0.075	Cijena	Hrk	n/a	6	0,45	n/a	8	0,6	n/a	8	0,6
5		Jednostavna izrada	0.075	Razina jednostavnosti	n/a	Srednja	6	0,45	Visoka	8	0,6	Visoka	7	0,535
6	Eksploatacija	Minimalna buka	0.175	Razina buke	dB	Visoka	4	0,7	Srednje N	7	1,225	Srednje N	7	1,1225
7		Jednostavno održavanje	0.1225	Težina održavanja	n/a	Srednja	5	0,6125	Srednje N	7	0,8575	Srednje N	7	0,8575
8		Dostupnost dijelova	0.0525	Razina dostupnosti	n/a	Velika	8	0,42	Velika	8	0,42	Velika	8	0,42
9	Dizajn	Preglednost	0.035	Razina funkcionalnosti	n/a	Srednja	6	0,21	Srednje V	7	0,245	Srednje V	7	0,245
10		Manji gabariti	0.015	Dimenzija	mm	Srednja	6	0,09	Srednje V	7	0,105	Srednje V	7	0,105
11	Ekologija	Reciklabilni materijali	0.015	Postotak recikliranja	%	80%	8	0,12	80%	8	0,12	80%	7	0,105
12		Lako obnovljivi materijali	0.035	Postotak obnove materijala	%	80%	8	0,28	80%	8	0,28	80%	8	0,28
Ukupno		/	G = 1	/				6.375	/	7.6525	/		7,355	
								63.75 %	/	76.525%			73,55%	

2.1. Ekonomska dobrota konceptijskih varijanti

Ovi dio definira dopuštene troškove proizvodnje, odnosno troškove same izrade. Krajnji zadatak je definirati ekonomsku dobrotu.

2.1.1. Dopusšteni troškovi izrade

1. Cijena sličnog proizvoda (bez PDV-a)

Najniža cijena sličnog proizvoda na tržištu, bez PDV-a:

$$C_t = 6000 \text{ €}$$

2. Troškovi izrade i zarada trgovca

Neto cijena trgovca:

$$C_{t,\text{net}} = (0,7 \div 0,9) \cdot C_t = 0,8 \cdot 6000 \text{ €} = 4800 \text{ €}$$

3. Bruto prodajna cijena trgovca

$$BPC = C_{t,\text{net}} = 4800 \text{ €}$$

4. Neto prodajna cijena trgovca (NPC)

$NPC = BPC - \text{troškovi pakiranja, transporta, osiguranja...}$

$$NPC = 4800 \text{ €} - 400 \text{ €} = 4400 \text{ €}$$

5. Zarada proizvođača (Z) i vlastiti troškovi proizvoda (VTP)

$$Z = (8 \div 12 \%) \cdot VTP = 0,08 VTP$$

$$NPC = VTP + Z = VTP + 0,08 VTP$$

$$NPC = 1,08 VTP$$

$$VTP = NPC / 1,08 = 4400 \text{ €} / 1,08 = 4074 \text{ €}$$

6. Dopusšteni troškovi za izradu proizvoda

$$H_{\text{dop}} = VTP / \alpha = 4074 \text{ €} / 1,3 = 3113 \text{ €}$$

Troškovi izrade pojedine varijante moraju biti manji od dopuštenih troškova, $H < H_{dop}$.

2.1.2. Ekonomsko vrednovanje konceptijskih varijanti

7. Idealni troškovi za izradu proizvoda

$$H_{id} = 0,7 \cdot H_{dop}$$

$$H_{id} = 0,7 \cdot 3113 \text{ €} = 2180 \text{ €}$$

8. Troškovi izrade ekonomskih varijanti

Tablica 2.4 Tablica troškova prve varijante

Varijanta 1		
	Količina	Cijena
Kompresor i pripremna pneumatska jedinica	1 kom	200 €
Pneumatski vodovi	/	80 €
Pneumatski cilindri i elektromotori	/	400 €
Senzor pritiska	1 kom	250 €
Senzor temperature	1 kom	50 €
Digitalni display	1 kom	200 €
Kompjuterska jedinica	1 kom	200 €
Digitalna kamera s mogućnosti uvećavanja	1 kom	40 €
Elektro kablovi i manje elektro komponente	/	60 €
Materijal čelik	110 kg	300 €
Materijal aluminij	8 kg	90 €
Materijal plastika	6 kg	98 €

Materijal bronca	1 kg	35 €
Vijci, ležajevi i ostali spojni elementi za mehaniku i elektroniku	/	100 €
Tokarenje	20 € - 7 h	140 €
CNC glodanje	40 € - 9 h	360 €
Zavarivanje	40 € - 2 h	80 €
Bušenje	15 € - 3 h	45 €
Montaža	14 € - 20 h	280 €
Ukupno H1		3008 €

Tablica 2.5 Tablica troškova druge varijante

Varijanta 2		
	Količina	Cijena
Elektromotori	1 kom	137 €
Električne instalacije (vodovi)	/	40 €
Senzor pritiska	1 kom	250 €
Senzor temperature	1 kom	50 €
Digitalni display	1 kom	15 €
Kompjuterska jedinica	1 kom	200 €
Manje elektro komponente	/	70 €
Materijal čelik	110 kg	300 €
Materijal aluminij	8 kg	90 €
Materijal plastika	6 kg	98 €
Materijal bronca	1 kg	35 €
Vijci, ležajevi i ostali spojni elementi	/	10 €

Tokarenje	20 € - 7 h	140 €
CNC glodanje	40 € - 9 h	360 €
Zavarivanje	40 € - 2 h	80 €
Bušenje	15 € - 3 h	45 €
Montaža	14 € - 20 h	280 €
Ukupno H2		2220 €

Tablica 2.6 Tablica troškova treće varijante

Varijanta 3		
	Količina	Cijena
Steper motor	1 kom	50 €
Električne instalacije (vodovi)	/	40 €
Senzor pritiska	1 kom	250 €
Senzor temperature	1 kom	50 €
Digitalni display	1 kom	15 €
Kompjuterska jedinica	1 kom	200 €
Manje elektro komponente	/	70 €
Materijal čelik	110 kg	300 €
Materijal aluminij	8 kg	90 €
Materijal plastika	6 kg	98 €
Materijal bronca	1 kg	35 €
Vijci, ležajevi i ostali spojni elementi	/	10 €
Trapezna navojna šipka te ostali stezni elementi	1 set	170€
Tokarenje	20 € - 7 h	140 €

CNC glodanje	40 € - 9 h	360 €
Zavarivanje	40 € - 2 h	80 €
Bušenje	15 € - 3 h	45 €
Montaža	14 € - 20 h	280 €
Ukupno H3		2353 €

9. Ekonomska dobrota varijanti

Varijanta 1:

$$y_1 = H_{id} / H_1 = 2180 / 3008 = 0.724$$

Varijanta 2:

$$y_2 = H_{id} / H_2 = 2180 / 2220 = 0.981$$

Varijanta 3:

$$y_3 = H_{id} / H_3 = 2180 / 2220 = 0.926$$

10. Ukupna dobrota varijanti

Varijanta 1

$$-x_1 = 0.6375, y_1 = 0.724$$

$$D_1 = \sqrt{x_1 \times y_1} = 0.6793$$

Varijanta 2

$$-x_2 = 0.76525, y_1 = 0.981$$

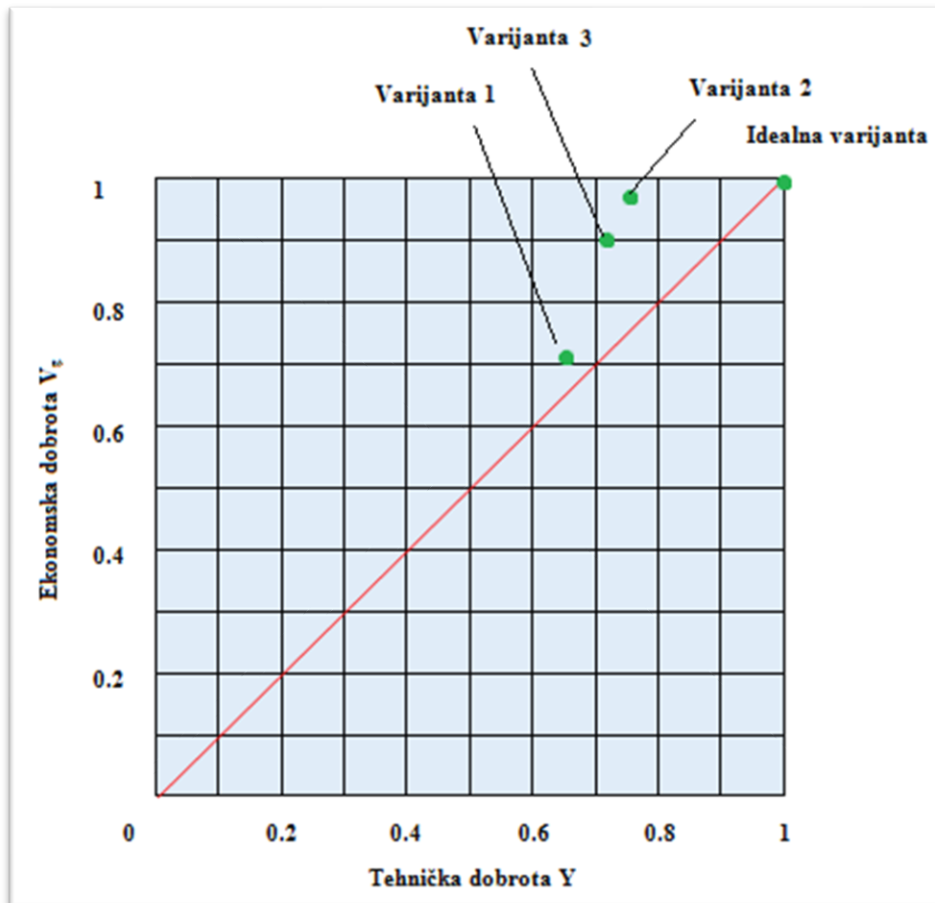
$$D_1 = \sqrt{x_1 \times y_1} = 0.8664$$

Varijanta 3

$$-x_3 = 0.7355, \quad y_3 = 0.926$$

$$D_1 = \sqrt{x_1 \times y_1} = 0.8252$$

Odbire se varijanta broj 2.



Slika 2.8 – Grafički prikaz ukupne dobrote varijanti

3. IZBOR MATERIJALA

3.1. Metoda više ograničenja – jedan cilj

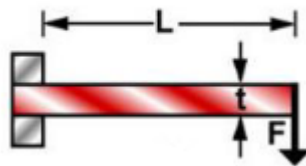
Za izbor materijala odabire se greda na koju se pričvršćuje ispitni uzorak te koja služi za prijenos opterećenja utega na sami ispitni uzorak. Konkretna komponenta je odabrana jer je izložena najvećim naprezanjima. Istu je potrebno posebno dorađivati (bušenje rupa za ispitne uzorke, narezivanje...). U tome leži odluka za odabir. Značaj ostalih komponenti je puno manji, a samim tim imaju i manju važnost za odabir materijala (npr. drvena ploča stola, cijevi potrebne za izradu postolja stola ...).

U tablici 3.1 prikazani su zahtjevi dizajna proizvoda, dok je na slici 3.1 označen izgled opterećenja grede.

Tablica 3.1 Tablica sa zahtjevima dizajna

Zahtjevi za kućište	
FUNKCIJA	Greda opterećena na savijanje
OGRANIČENJA	<p>Fiksna ograničenja:</p> <p>Duljina $L = 0.8$ m</p> <p>Širina $w = 0,05$ m</p> <p>Temperaturna otpornost od -50 do +80</p> <p>Aktivna ograničenja:</p> <p>1. Krutost $S = \frac{F}{\delta_{\max}} = \frac{100 \text{ N}}{1 \text{ mm}} = 100 \text{ N/mm}$;</p> <p>Dinamička izdržljivost (R_d)</p> <p>$S_1 = 1,5$ (faktor sigurnosti aspekta čvrstoće)</p>
CILJ	Minimalna cijena grede
SLOBODNE VARIJABLE	Izbor materijala i debljina (t)

Greda je opterećena na savijanje. U tablici 3.2 prikazujemo zahtjeve dizajna za prvo ograničenje.



Slika 3.1 –Greda opterećena na savijanje [3]

Tablica 3.2 Tablica sa zahtjevima dizajna za prvo ograničenje

Zahtjevi za prvo ograničenje	
FUNKCIJA	Lagana greda
OGRANIČENJA	Savojna krutost (S)
CILJ	Minimalna cijena grede
SLOBODNE VARIJABLE	Izbor materijala i debljina (t)

Ograničenje 1 : Treba zadovoljiti uvjet krutosti (S)

-Cilj $C1 = Cm \cdot t \cdot w \cdot L \cdot \rho$ (3.1)

-Ograničenje $S = \frac{C_1 \cdot E \cdot I}{L^3}$ (3.2)

-Moment inercije $I = \frac{w \cdot t^3}{12}$ (3.3)

Uvrštavanjem izraza (3.3) u (3.2) dobije se izraz za slobodnu varijablu, debljina stijenke t .

Debljina stijenke $t = \left(\frac{12 \cdot S \cdot L^3}{C_1 \cdot E \cdot w} \right)^{1/3}$ (3.4)

Uvrštavanjem izraza (3.4) u jednadžbu (3.1) dobije se izraz za cilj, odnosno minimalnu cijenu.

Cilj uz ograničenje 1 $C1 \geq \left(\frac{12 \cdot S}{C_1} \right)^{1/3} \cdot (w^{2/3} \cdot L^2) \cdot \left(\frac{\rho \cdot Cm}{E^{1/3}} \right)$ (3.5)

Cijena grede će biti minimalna ako je veličina koja objedinjuje svojstva materijala $\left(\frac{\rho \cdot Cm}{E^{1/3}}\right)$ minimalna, odnosno ako je njezina recipročna vrijednost – indeks materijala maksimalan:

$$M_1 = \frac{\rho \cdot Cm}{E^{1/3}}$$

Ograničenje 2 : Dinamička izdržljivost

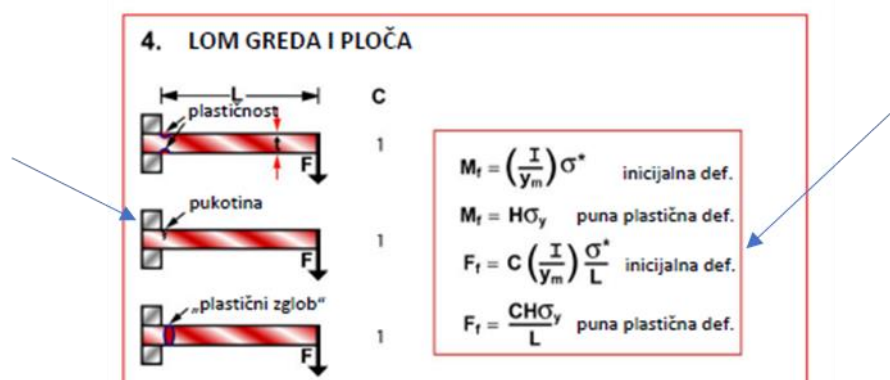
Drugo ograničenje se odabire zbog sigurnosnih razloga, jer je proizvod dinamički opterećen.

U tablici 3.3 prikazuju se zahtjevi za drugo ograničenje proizvoda.

Tablica 3.3 Tablica sa zahtjevima dizajna za drugo ograničenje

Zahtjevi za drugo ograničenje	
FUNKCIJA	Lagana greda
OGRANIČENJA	Dinamička izdržljivost
CILJ	Minimalna cijena
SLOBODNE VARIJABLE	Izbor materijala i debljina stijenke (t)

Tablično odabiremo vrstu opterećenja i odgovarajuće formule (slika 3.2).



Slika 3.2 – Odabir iz tablica [3]

y_m - udaljenost od neutralne linije do najudaljenije plohe profila

C - konstanta ovisna o geometriji i rubnim uvjetima

F_f - čvrstoća materijala

Cilj $C_2 = C_m \cdot t \cdot w \cdot L \cdot \rho$ (3.6)

Ograničenje $F_f = C_2 \cdot \left(\frac{I}{Y_m}\right) \left(\frac{\sigma_d}{L}\right)$ (3.7)

$$F_f = C_2 \cdot \left(\frac{wt^3}{\frac{12}{t}}\right) \left(\frac{\sigma_d}{L}\right) \quad (3.7)$$

$$F_f = C_2 \cdot \left(\frac{wt^2}{6}\right) \left(\frac{\sigma_d}{L}\right) \quad (3.7)$$

$$\sigma_d = \frac{F_f \cdot L \cdot 6}{C_2 \cdot w \cdot t^2} \leq \frac{R_d}{S_1} \quad (3.7)$$

$$R_d \geq \frac{F_f \cdot L \cdot 6 \cdot S_1}{C_2 \cdot w \cdot t^2} \quad (3.7)$$

Debljina stijenke $t \geq \left(\frac{F_f \cdot L \cdot 6 \cdot S_1}{C_2 \cdot w \cdot R_d}\right)^{\frac{1}{2}}$ (3.8)

Uvrštavanjem izraza (3.8) u izraz (3.6) dobijemo cilj uz ograničenje 2

$$\text{Cilj} \quad C_2 = Cm \cdot \left(\frac{F_f \cdot L \cdot 6 \cdot S_1}{C_2 \cdot w \cdot R_d} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot w \cdot L \cdot \rho \quad (3.9)$$

Indeks materijala:

$$M_2 = \frac{Cm \cdot \rho}{R_d^{\frac{1}{2}}}$$

Kada se izjednače dva izraza za cijenu $C_1 = C_2$ dobije se jednadžba pravca koja povezuje indekse materijala M_1 i M_2 :

$$\left(\frac{12 \cdot S}{C_1} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (w^{2/3} \cdot L^2) \cdot M_1 = \left(\frac{F_f \cdot 6 \cdot S_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot w^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{3}{2}} \cdot M_2 \quad (3.10)$$

$$M_2 = \frac{\left(\frac{12 \cdot S}{C_1} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (w^{2/3} \cdot L^2)}{\left(\frac{F_f \cdot 6 \cdot S_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot w^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{3}{2}}} M_1 \quad (3.11)$$

- Spojna konstanta C_c :

$$C_c = \frac{\left(\frac{12 \cdot S}{C_1} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (w^{2/3} \cdot L^2)}{\left(\frac{F_f \cdot 6 \cdot S_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot w^{\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{3}{2}}} \quad (3.12)$$

U izraz se zatim uvrštava:

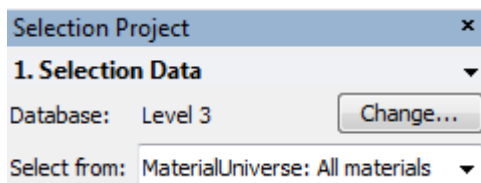
- $S_1 = 1.5$
- $S = 100 \text{ N/mm}$
- $\delta_{max} = 1 \text{ mm}$
- $C_1 = 3$
- $C_2 = 1$
- $L = 0,8 \text{ m}$
- $w = 0.05 \text{ m}$
- $F_f = 100 \text{ N}$

- Spojna konstanta C_c :

(3.12)

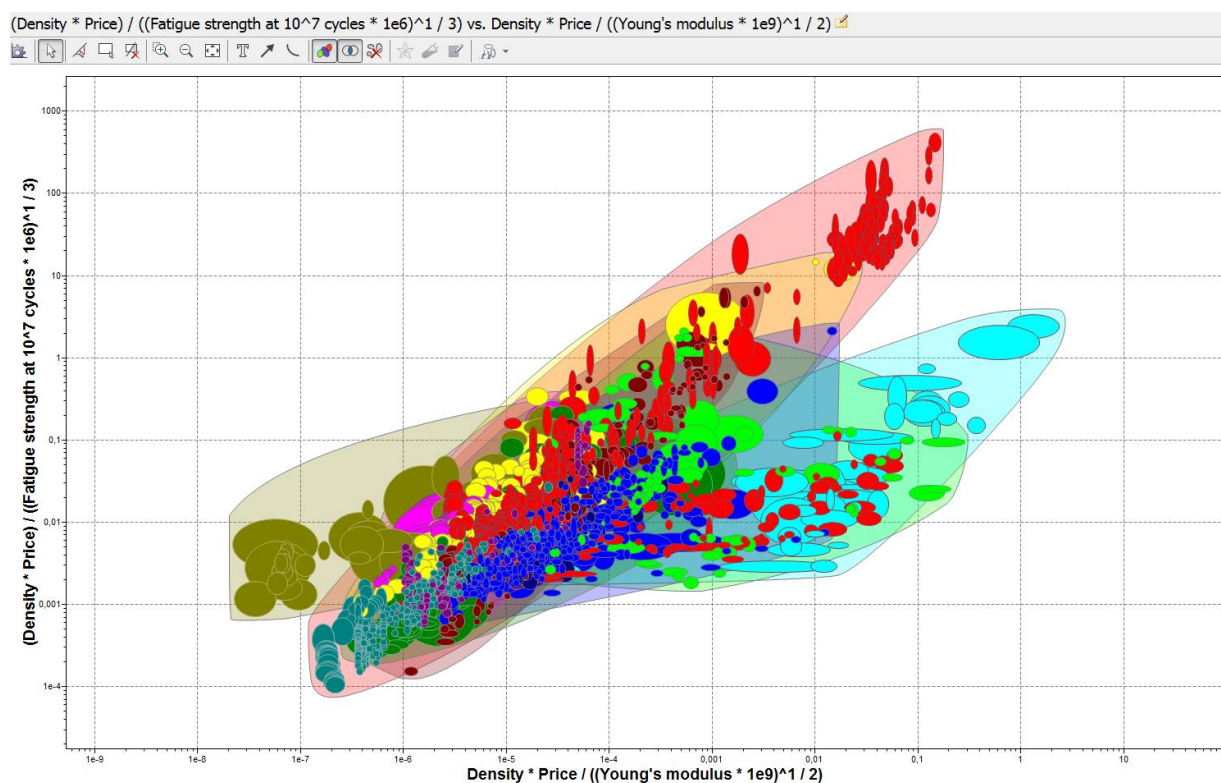
$$C_c = \frac{\left(\frac{12 \cdot 100000}{3}\right)^{1/3} \cdot (0,05^{2/3} \cdot 0,8^2)}{\left(\frac{100 \cdot 6 \cdot 1,5}{1}\right)^{1/2} \cdot 0,05^{1/2} \cdot 0,8^{3/2}} = 1,333$$

Za metodu dva ograničenja te jednog cilja uzima se najveća baza materijala Level 3 (Slika 3.3).



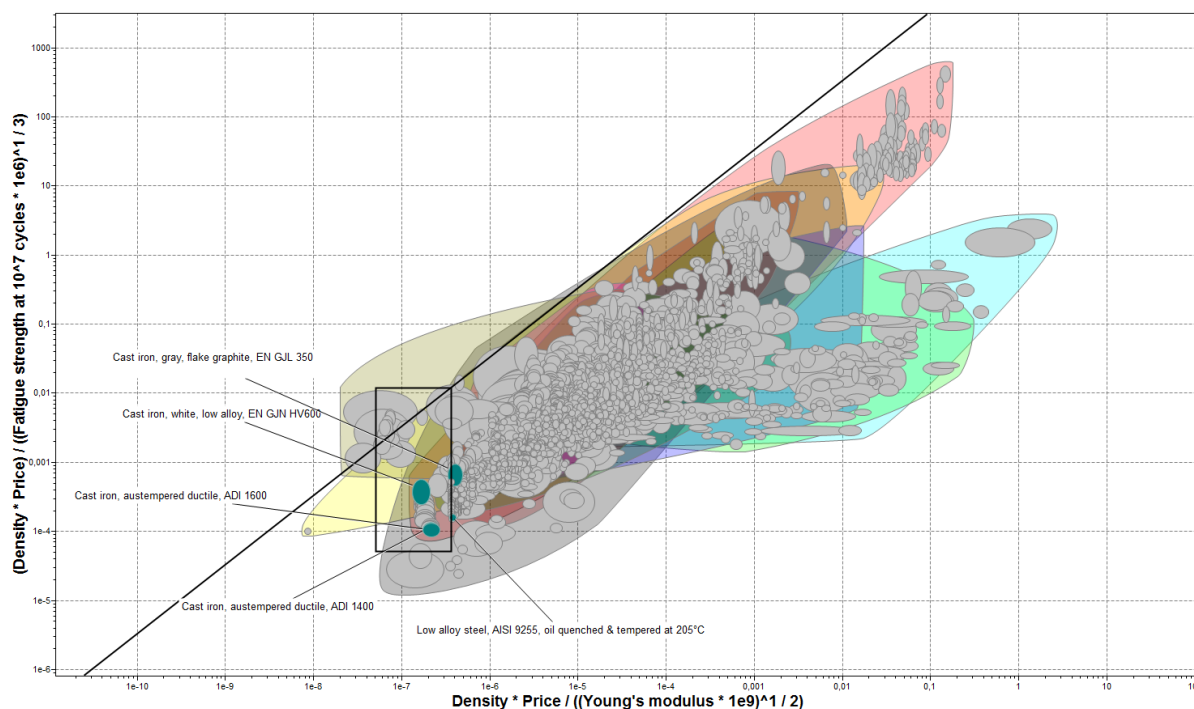
Slika 3.3 – Izbor baze materijala [4]

Nakon što su indeksi M_1 i M_2 utvrđeni kao osi apscisa i ordinata generiran je dijagram svojstava materijala prikazan na slici 3.4.



Slika 3.4 – Generirani dijagram svojstava materijala čije su osi indeksi materijala M_1 i M_2 [4]

Nakon što se dobio generirani dijagram, slijedeći korak je ucrtavanje spojnice (čiji je nagib u dijagramu jednak 1, a položaj je određen vrijednošću spojne konstante $C_C = 1,333$) te definiranje fiksnih ograničenja prikazanih u tablici 3.1. Na slici 3.5. je prikazan dijagram svojstava materijala s ucrtanom spojnicom i okvirom za izbor materijala na način da izolira materijale koji su najbolji izbor.



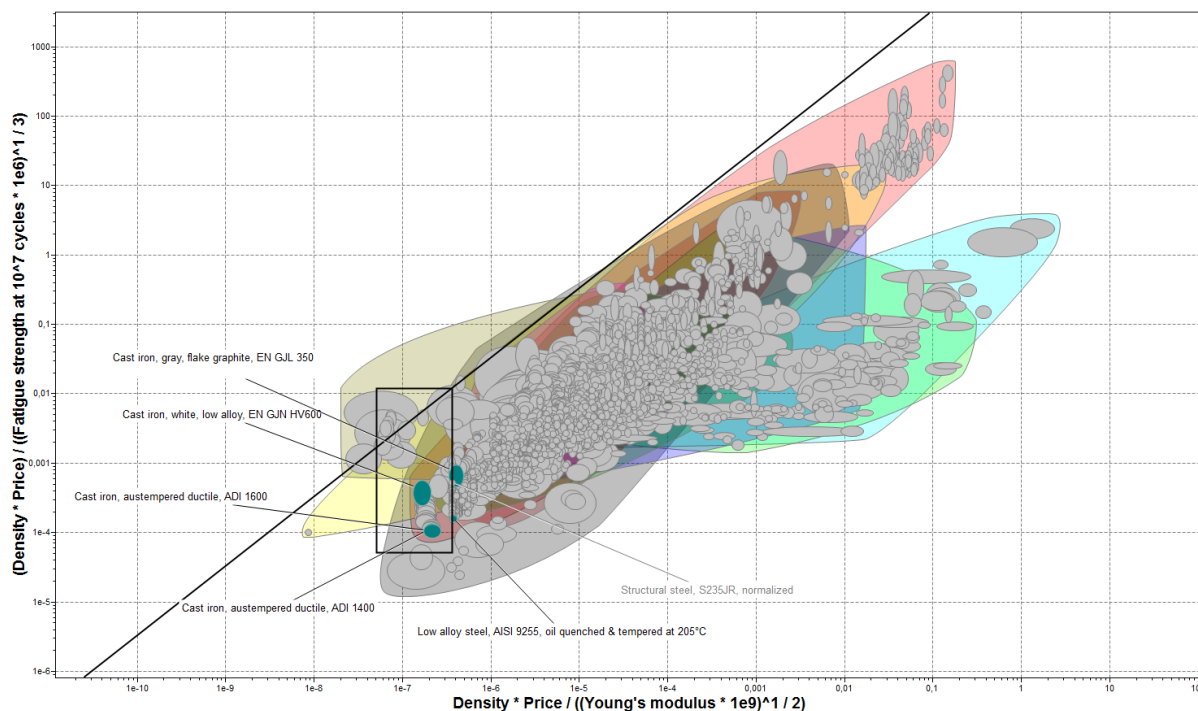
Slika 3.5– Generirani dijagram svojstava materijala s najboljim materijalima [4]

Tablica 3.4 Izbor pet najpovoljnijih materijala

	Cijena HRK/kg	Gustoća kg/m ³	Dinamička izdržljivost MPa	Youngov modul elastičnosti GPa	Indeks materijala $M_1 = \frac{\rho \cdot Cm}{E^{1/3}}$	Indeks materijala $M_2 = \frac{Cm \cdot \rho}{R_d^{1/2}}$
Cast iron ADI 1600	1,96 - 2,97	7010 - 7110	444 - 518	155 - 163	3205,8	791,8
Cast iron ADI 1400	1,96 - 2,97	7020 - 7120	435-508	156 - 165	3203,6	801,3
Cast iron EN GJN HV600 (XCr11)	4,87 - 6,01	7600 - 8000	120 - 180	165 - 220	7355.1	3464.5
Cast iron EN GJN 350	4,87 - 6,01	7600 - 8000	120 - 180	165 - 220	7355.1	3464.5
Low alloy steel AISI 9255	4,87 - 5,13	7800 - 7900	668 - 771	206 – 216	6592,9	1463,7

Svi materijala navedeni u tablici 4.4 se mogu uzeti u obzir, a kao najbolji materijal je ipak uzet ASTM A36 (S235JR) jer je njegova učestalost veća te je lakše dobavljiv kod lokalnih dobavljača za profil potreban u ovom projektu.

Na slici 3.6 je prikazan položaj novoodabranog materijala u grafu.



Slika 3.6– Položaj novog materijala ASTM A36 u grafu [4]

Tablica 3.5 Karakteristike materijala ASTM A36

	Cijena HRK/kg	Gustoća kg/m ³	Dinamička izdržljivost MPa	Youngov modul elastičnosti GPa	Indeks materijala $M_1 = \frac{\rho \cdot Cm}{E^{1/3}}$	Indeks materijala $M_2 = \frac{Cm \cdot \rho}{R_d^{1/2}}$
ASTM A36	4,75 - 4,97	7800 - 7900	231 - 325	200 - 215	6405,28	2275,26

$$t \geq \left(\frac{F_f \cdot L \cdot 6 \cdot S_1}{C_2 \cdot w \cdot R_d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

$$t > 8,38 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Nakon što je izračunata minimalna visina grede, odabire se minimalna visina koja najbolje odgovara zahtjevima projekta (stabilnost stegnutog uzorka, dovoljna visina za provrt za stezni element bez narušavanja strukture i stabilnosti).

Na slici 3.6 je prikazan isječak iz kataloga lokalnog dobavljača, tvrtke Strojopromet d.o.o.

CRNA METALURGIJA

SP Crna metalurgija - Šipke vučene - valjane

Navedene dimenzije nudimo u sljedećim kvalitetama:

RST37.2, S235JR ST44.2, S275JR ST52-3N, S355J2G3	C45E C60E C75E	51CrV40pružni 60SiMn50pružni OSTALO
--	----------------------	---

Dimenzije mm	2	3	4	5	6	8	10	12	15	16	18	20	25	30	35	40	50	60
	težina kg/m																	
10	0,160	0,236	0,314	0,392	0,471	0,628												
12	0,192	0,283	0,377	0,471	0,565	0,754	0,942											
14	0,224	0,330	0,440	0,550	0,659	0,879	1,100	1,32										
15	0,240	0,353	0,471	0,589	0,706	0,942	1,180	1,41										
16	0,256	0,377	0,502	0,628	0,754	1,000	1,260	1,51										
18	0,288	0,424	0,565	0,706	0,848	1,130	1,410	1,70	2,12									
20	0,320	0,471	0,628	0,785	0,942	1,260	1,570	1,88	2,36	2,51	2,83							
25	0,400	0,589	0,785	0,981	1,180	1,570	1,960	2,36	2,94	3,14	3,53	3,93						
30	0,480	0,707	0,942	1,180	1,410	1,880	2,360	2,83	3,53	3,77	4,24	4,71	5,89					
35	0,560	0,824	1,100	1,370	1,650	2,200	2,750	3,30	4,12	4,40	4,95	5,50	6,87	8,24				
40	0,640	0,942	1,260	1,570	1,880	2,510	3,140	3,77	4,71	5,02	5,65	6,28	7,85	9,42	10,99			
45	0,70	1,060	1,410	1,770	2,120	2,830	3,530	4,24	5,30	5,65	6,36	7,06	8,83	10,60	12,36	14,13		
50	0,78	1,180	1,570	1,960	2,360	3,140	3,920	4,71	5,89	6,28	7,06	7,85	9,81	11,78	13,74	15,70		
55		1,300	1,730	2,160	2,590	3,450	4,320	5,18	6,48				8,64	10,80	12,95	15,11	17,25	
60		1,410	1,880	2,360	2,830	3,770	4,710	5,65	7,06	7,54	8,48	9,42	11,78	14,13	16,49	18,84	23,60	
65		1,530	2,040	2,550	3,060	4,080	5,100	6,12	7,65				10,21	12,76	15,31	17,86	20,41	25,50

Slika 3.7– Isječak iz kataloga s dostupnim materijalima [5]

$$t = 10 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$C = Cm \cdot t \cdot w \cdot L \cdot \rho \quad (3.16)$$

$$C = 15,25 \text{ HRK} \quad (3.17)$$

Nakon što je cijena grede izračunata, zbog statičkog proračuna grede potrebno je izračunati masu njenu masu.

$$m = t \cdot w \cdot L \cdot \rho \quad (3.18)$$

$$m = 3,14 \text{ kg} \quad (3.19)$$

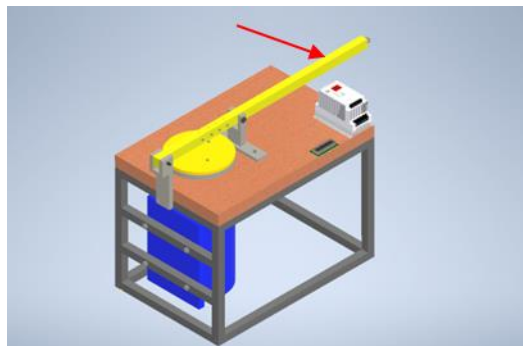
4. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA I PRORAČUN

Da bi se uređaj mogao projektirati, potrebno je znati snagu elektromotora koji taj uređaj pokreće. Da bi saznali minimalnu potrebnu snagu, potrebno je izračunati moment koji taj elektromotor mora savladati.

4.1. Proračun nosive grede

Prvi korak u proračunu snage motora je izračun sile kojom se pritišće rotirajući disk. Za izračun sile, nosiva greda našeg uređaja prikazana je kao statički neodređen nosač. Izračunava se reakcija na osloncu B koji je zapravo sami ispitni uzorak.

Na slici 4.1 je prikazana greda koju proračunavamo



Slika 4.1 – Greda na uređaju [6]

Težina grede je prikazana kao kontinuirano opterećenje.

$$m = 3,14 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

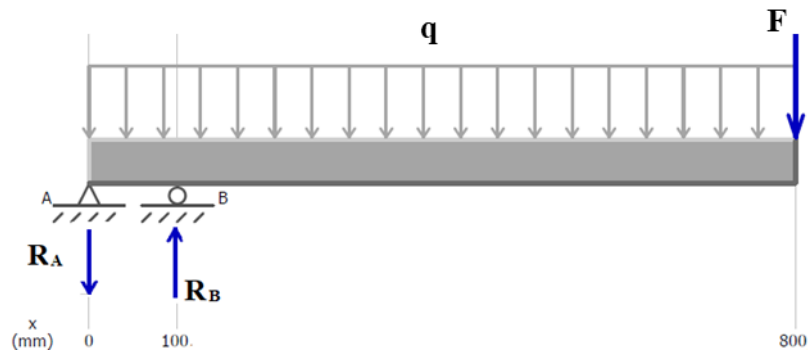
$$l = 0,8 \text{ m}$$

$$q = \frac{m \times g}{l} = 38,5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Ostale zadane vrijednosti :

$$F = 100 \text{ N}$$

$$l = 0,8 \text{ m}$$



Slika 4.2 Prikaz grede [7]

$$(1) \sum F_x = 0; F_x = 0$$

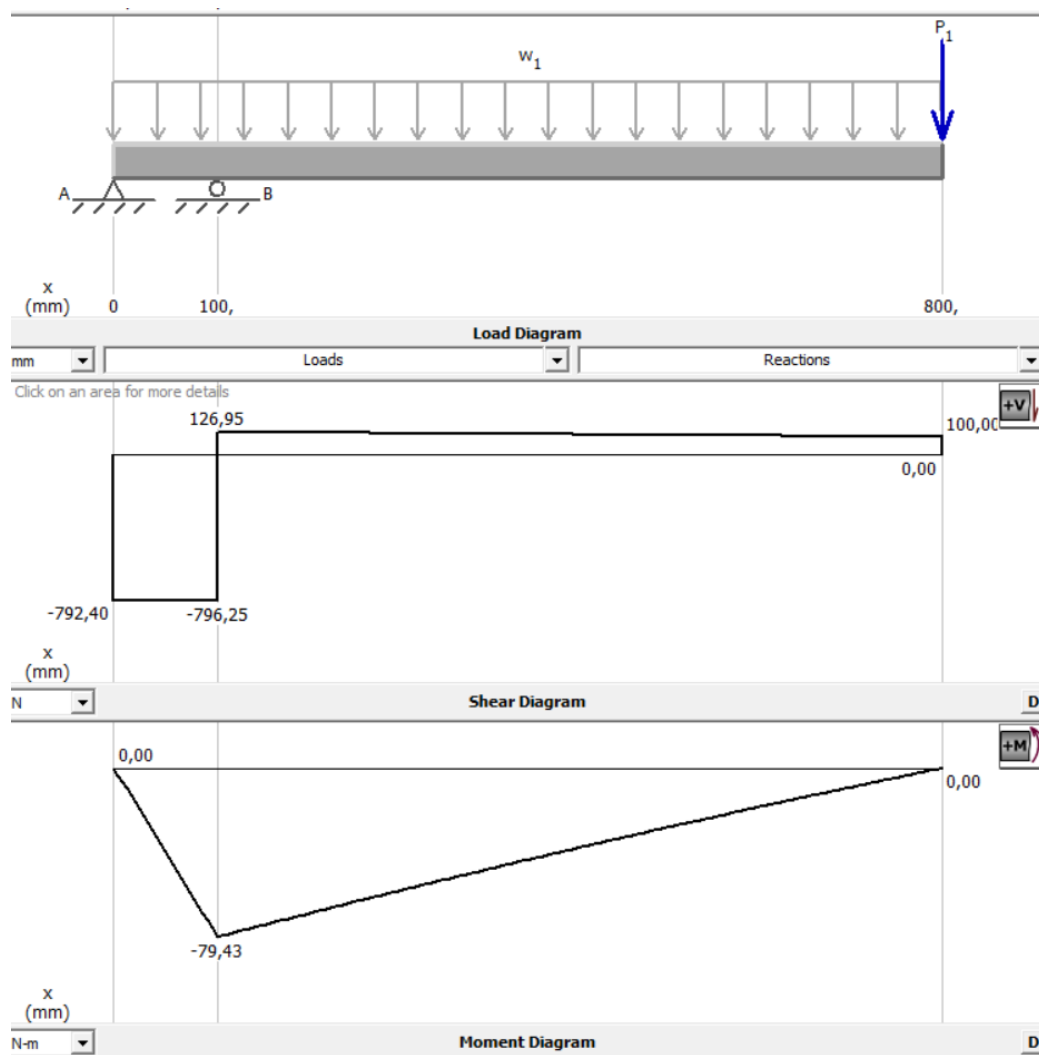
$$(2) \sum F_y = 0; R_A - R_B + q \times l + F = 0$$

$$(3) \sum M_a = 0; -R_B \times 0,1 + q \times l \times l/2 + F \times 0,8$$

$$(3) R_B = \frac{q \times \frac{l^2}{2} + F \times 0,8}{0,1} = 923,2 \text{ N}$$

$$(2) R_A = 792,4 \text{ N}$$

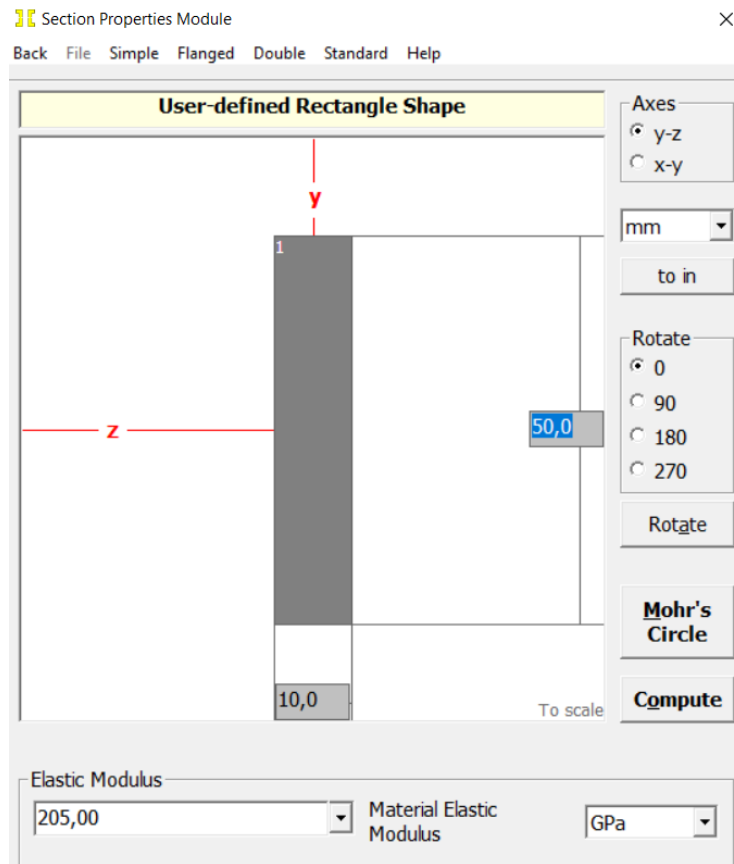
Dobiveni rezultati se provjeravaju u programu MD Solids i prikazani su na slici 4.3.



Slika 4.3 Prikaz grede sa silama, reakcijama u osloncima te maksimalnim momentom [7]

$$M_{Ymax} = 79,43 \text{ Nm}$$

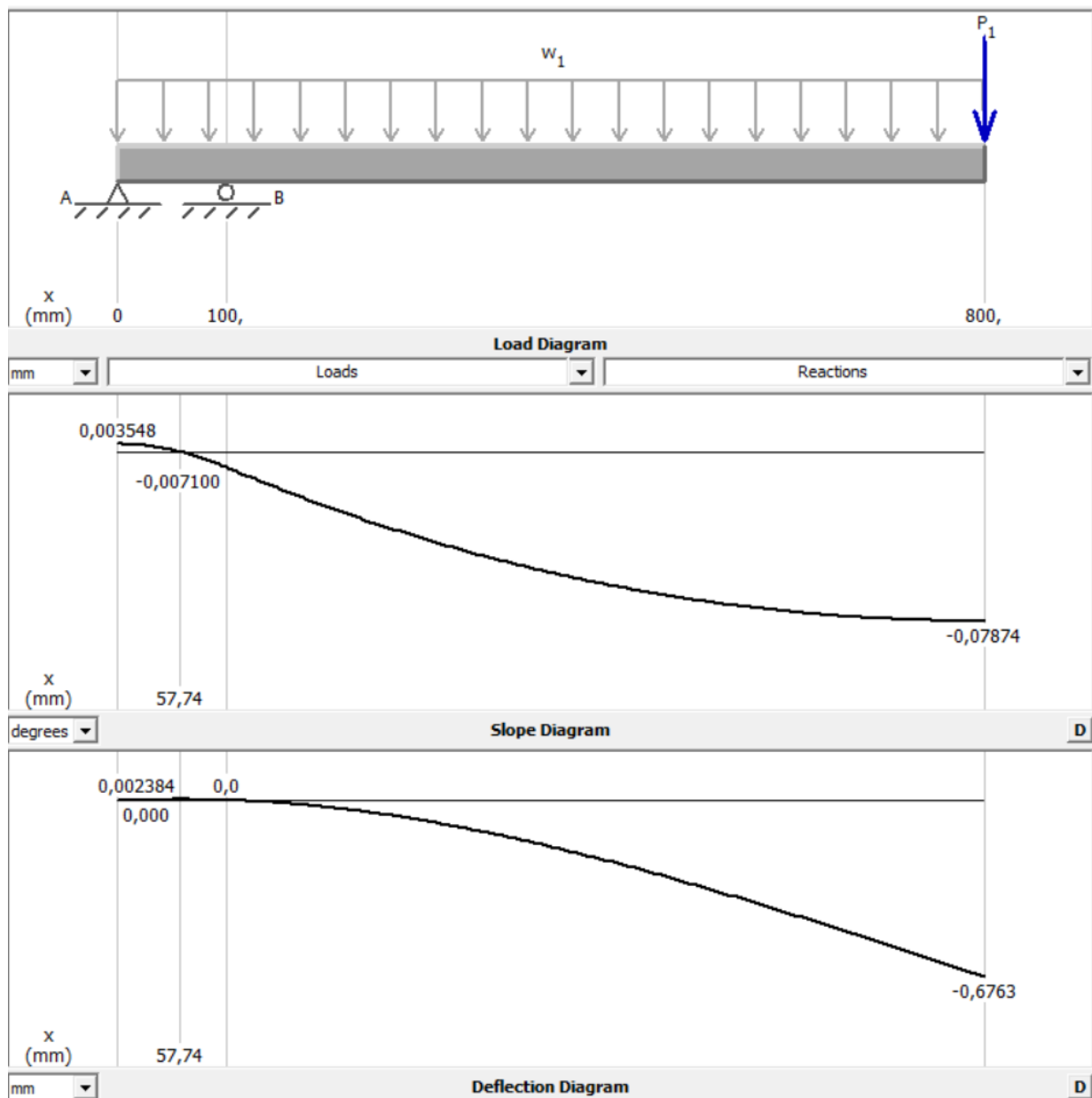
Nakon što su proračunate sile, u programu MD Solids se označavaju parametri našeg materijala (Slika 4.5), dobivaju se rezultati površine poprečnog presjeka (Slika 4.6) te se izračunava maksimalni progib te maksimalni nagib grede te su isti prikazani na slici 4.7.



Slika 4.4 Parametri upisani u program MD Solids [7]

Z Axis Properties				Y Axis Properties			
Elastic Modulus	E	205,0000	GPa	Elastic Modulus	E	205,0000	GPa
From bottom to centroid	y (bot)	25,0000	mm	From left to centroid	z (left)	5,0000	mm
From centroid to top	y (top)	25,0000	mm	From centroid to right	z (right)	5,0000	mm
Area of shape	A	500,0000	mm ²	Area of shape	A	500,0000	mm ²
Moment of Inertia	Iz	104.166,6667	mm ⁴	Moment of Inertia	Iy	4.166,6667	mm ⁴
Section Modulus	Sz	4.166,6667	mm ³	Section Modulus	Sy	833,3333	mm ³
Section Modulus (bottom)	S (bot)	4.166,6667	mm ³	Section Modulus (left)	S (left)	833,3333	mm ³
Section Modulus (top)	S (top)	4.166,6667	mm ³	Section Modulus (right)	S (right)	833,3333	mm ³
Radius of Gyration	rz	14,4338	mm	Radius of Gyration	ry	2,8868	mm
Plastic Modulus	Zz	6.250,0000	mm ³	Plastic Modulus	Zy	1.250,0000	mm ³
Shape Factor		1,5000		Shape Factor		1,5000	
From bottom to plastic n.a.	yp (bot)	25,0000	mm	From left to plastic n.a.	zp (left)	5,0000	mm
From plastic n.a. to top	yp (top)	25,0000	mm	From plastic n.a. to right	zp (right)	5,0000	mm
Polar Moment of Inertia	J	108.333,3333	mm ⁴	Polar Moment of Inertia	J	108.333,3333	mm ⁴
Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴	Product of Inertia	Iyz	0,0000	mm ⁴
Maximum Moment of Inertia	Imax	104.166,6667	mm ⁴	Maximum Moment of Inertia	Imax	104.166,6667	mm ⁴
Minimum Moment of Inertia	Imin	4.166,6667	mm ⁴	Minimum Moment of Inertia	Imin	4.166,6667	mm ⁴
Angle from z axis to Imax axis	β	0,0000	degrees	Angle from y axis to Imax axis	β	90,0000	degrees
		Counterclockwise				Clockwise	

Slika 4.6 Rezultati proračuna površine poprečnog presjeka MD Solids [7]



Slika 4.7 Prikaz grede sa maksimalnim progibom i maksimalnim nagibom [7]

Iz proračuna u programu MD Solids, dobiveni su rezultati :

$$\delta_M = 0,6763 \text{ mm}$$

$$\beta_M = 0,07874^\circ$$

4.2. Proračun potrebne snage elektromotora

Sljedeći korak je proračun potrebne snage elektromotora. Uz već poznate parametre, potrebni su i neki dodatni koji su ujedno i zahtjev uređaja, a to su:

n_{MIN} – minimalni broj okretaja – 100 okr/min

μ_{MAX} – maksimalni moment trenja - 1,35

D – maksimalni promjer na kojem se ispituje uzorak – 180 mm

Maksimalni moment trenja je odabran iz već poznatih strojarskih tablica i on za ispitni par ALUMINIJ – ALUMINIJ iznosi 1,35 prema izvoru [8]:

Prema već izračunatim vrijednostima sila na površinu, jednaka je reakciji u osloncu B, koji je ujedno i ispitni uzorak.

$$F = F_N$$

$$F_T = F_N \times \mu_{MAX} = 1246,32 \text{ N}$$

$$P_{EM} \geq F_T \times \frac{D}{2} \times \frac{2 n_{MIN} \pi}{60}$$

$$P_{EM} \geq 1174,62 \text{ W}$$

Vršni moment koji se javlja prema proračunu iznosi $M_t = 112,16 \text{ Nm}$.

Nakon što je izračunata minimalna potrebna snaga elektromotora, pronalazi se najbliži elektromotor koji se proizvodi za opću upotrebu i to je elektromotor Serije **Z.59-LE90ZLR4P** model oznake **2KJ3105-EM23-K1** tvrtke Siemens [9] prikazan na Slici 4.8 i parametri istog na slici 4.9.

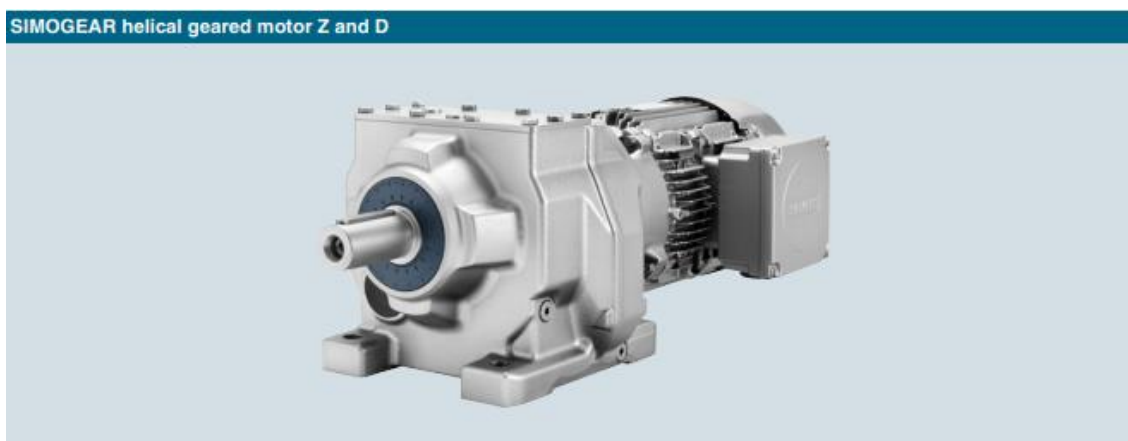


Fig. 3/1 Helical geared motor Z and D

Slika 4.8– Slika proizvoda tvrtke Siemens [9]

Tablica 4.1 Isječak iz opisa proizvoda tvrtke Siemens [9]

SIMOGEAR geared motors								
Helical geared motors								
Geared motors up to 55 kW								
Selection and ordering data (continued)								
P_{rated} kW	n_2 rpm	T_2 Nm	i -	F_{R2} N	f_B -	m kg	Article No. (Article No. supplement → below)	Order code No. of poles
1.5	Z.59-LE90ZLR4P							
	25	565	56.99	7 210	0.80	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ A2	
	28	510	51.81	7 570	0.88	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ X1	
	33	435	44.06	7 400	1.0	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ W1	
	36	395	40.06	7 270	1.1	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ V1	
	40	350	35.74	7 120	1.3	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ U1	
	45	315	32.05	6 950	1.4	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ T1	
	50	285	28.89	6 790	1.6	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ S1	
	54	260	26.66	6 680	1.7	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ R1	
	59	240	24.34	6 530	1.9	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ Q1	
	72	200	20.20	6 240	2.2	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ P1	
	76	188	19.01	6 140	2.4	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ N1	
	81	178	17.95	6 050	2.5	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ M1	
	95	151	15.27	5 800	3.0	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ L1	
110	130	13.09	5 560	3.5	32	2KJ3105 - ■ EM23 - ■ ■ K1		
Z.49-LE90ZLR4P								
	36	400	40.31	5 300	0.80	30	2KJ3104 - ■ EM23 - ■ ■ X1	

Karakteristike odabranog elektromotora su označene u tablici 4.1.

5. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu izvršio se razvoj i konstrukcijska razrada jednostavnog tribometra za edukacijske svrhe uz pomoć razvojnih programa poput Granta EduPack, MD Solids, Autodesk Inventor te dostupne literature. Osnovni cilj je bio projektirati napravu koja ima mogućnost triboloških ispitivanja različitih materijala, pa čak i onih najotpornijih na trošenje uz minimalnu cijenu izrade. Prilikom samog razvoja došlo je do više promjena izbora materijala, ponajviše zbog nedostupnosti istih na tržištu. Optimalni materijali, dobiveni metodičkim izborom materijala, se nisu koristili zbog nedostupnosti na lokalnom tržištu. Sam proces proizvodnje i narudžbe istih doveo do povećanih troškova materijala za izradu naprave. Umjesto lijevanog željeza ADI 1600, odabranog uz pomoć programa GRANTA EduPack, odabran je materijal koji se najčešće koristi za slične konstrukcije dostupan na hrvatskom tržištu, a to je S235JR (ASTM A36) koji se u dijagramu svojstava materijala nalazi jako blizu najboljim materijalima, kako po performansama tako i po cijeni. Sila na uzorku ostvaruje se primjenom poluge i utega. Maksimalna sila predviđena za ispitivanje iznosi 1 kN, što se dobije vješanjem utega težine 100 N na drugom kraju poluge. Put klizanja uzorka u jedinici vremena regulira se postavljanja ispitnog uzorka na odgovarajući promjer ispitnog diska i on je u rasponu od 0,05 m/s za najmanji ispitni promjer od 5 mm do 1,09 m/s za najveći ispitni promjer. Moment koji se javlja na disku pri najvećem opterećenju dostiže 80 Nm. Konstrukcijski je zahtjev na broj okretaja diska reda veličine 100 okr/min. Ovo se ostvaruje izborom elektromotora s ugrađenim reduktorom serije Z.59-LE90ZLR4P oznake 2KJ3105-EM23-K1 i snage 1500 W s deklariranim zakretnim momentom na izlaznom vratilu 130 Nm i brojem okretaja 110 okr/min tvrtke Siemens.

Literatura

1. V. Ivušić, "Tribologija", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
2. P. Kulišić, Mehanika i toplina, Školska knjiga, Zagreb, 1985 , Veljača 2022
3. Ashby, M.F.: Materials Selection and Mechanical Design, 4th edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2011 , Ožujak 2022
4. Ansys: Granta - CES Edupack [2021](#) Ožujak 2022
5. Strojopromet katalog, <https://strojopromet.com/wp-content/uploads/2020/07/strojopromet-katalog-2020.pdf> , Svibanj 2022
6. Autodesk: Autodesk Inventor 2022 , Veljača 2022
7. MD Solids, <https://web.mst.edu/~mdsolids/>, Travanj 2022
8. Engineers edge(web stranica), https://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm , Svibanj 2022
9. Siemens katalog, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cbbf31a3-ce14-405a-8a5e-44c1e629ef2e/catalog-md-50-1-simogear-geared-motors.pdf> , Svibanj 2022

Prilozi

- Prilog 1 – Montažni crtež Naprave
- Prilog 2 – Montažni crtež Prijenosa uređaja
- Prilog 3 – Radionički crtež Okvira naprave
- Prilog 4 – Radionički crtež Stezne glave
- Prilog 5 – Radionički crtež Šipke
- Prilog 6 – Radionički crtež Radne ploče
- Prilog 7 – Radionički crtež Nogice postolja
- Prilog 8 – Radionički crtež Osigurača ispitne šipke
- Prilog 9 – Radionički crtež Držača ispitne šipke
- Prilog 10 – Radionički crtež Držača utega
- Prilog 11 – Radionički crtež Okova ležaja
- Prilog 12 – Radionički crtež Prijenosnog vratila
- Prilog 13 – Radionički crtež Spojke na prijenosnom vratilu
- Prilog 14 – Radionički crtež Spojke na vratilu elektromotora
- Prilog 15 – Radionički crtež Radnog diska