MODEL EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA ISPITIVANJE IZVIJANJA

BIKIĆ, FRANE

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:228:314152

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of University Department of Professional Studies

SVEUČILIŠTE U SPLITU

SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

FRANE BIKIĆ

Z A V R Š N I R A D

MODEL EDUKACIJSKE NAPRAVE ZA ISPITIVANJE IZVIJANJA

Split, lipanj 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE
Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Materijali 1

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Frane Bikić

Naslov rada: Model edukacijske naprave za ispitivanje izvijanja

Mentor: Igor Gabrić, viši predavač

Split, lipanj 2019.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Materijali 1
Nastavnik: Igor Gabrić, viši predavač

ZADATAK

Kandidat: Frane Bikić

Zadatak: Model edukacijske naprave za ispitivanje izvijanja

Tekst zadatka:

- Uvodno o izvijanju i ispitivanju izvijanja;
- Tehnički zahtjevi naprave za ispitivanje izvijanja;
- Metodičkim pristupom ponuditi minimalno dvije varijante naprave;
- Prema ekonomskim i tehničkim kriterijima vrednovati varijante i odabrati najbolju;
- Prema odabranoj varijanti konstruirati i dimenzionirati napravu za ispitivanje izvijanja;
- Izabrati materijal za izradu naprave općim metodološkim postupkom;
- Predvidjeti mjerenje ulaznih i izlaznih veličina pomoću senzora i mikrokontrolera (udaljenosti, pomaci, sile...);
- Shematski prikazati električnu instalaciju naprave;
- Primjenom CAD programa 3D izraditi model, potrebne nacrte i radioničke crteže;
- Iznijeti zaključke;
- Navesti literaturu i izvore podataka.

Sažetak

U okviru ovog rada izvršeno je konstruiranje, izrada i testiranje uređaja za ispitivanje izvijanja te su ukratko opisani pojmovi vezani za izvijanje.

Konstruiranje je izvršeno uz primjenu metodičkog razvoja proizvoda. U radu su opisane i razrađene dvije varijante od kojih je usvojena bolja varijanta na temelju tehničkog i ekonomskog vrednovanja varijanti.

Odabrana varijanta je u potpunosti konstrukcijski razrađena. Izrada svih crteža je obavljena primjenom računalnog CAD programa. Izrađeni su i svi radionički crteži potrebni za izradu uređaja koji se nalaze u prilogu rada. Uređaj je izrađen u strojarskom laboratoriju.

Ključne riječi: izvijanje, uređaj za izvijanje, elastično izvijanje

Summary

In this final work, the apparatus (test device) for buckling test has been fully described and there are briefly described terms which are related to the process of buckling.

Construction of the test device has been done by methodical product development. There are two variants in this work, which are described and elaborated and the more advantageous one has been selected due to technical and economic evaluation of the variants.

The selected variant was completely constructed and finally produced in mechanical laboratory. Drafting was completely made by using a CAD computer program. All of drawings which are necessary for the construction of the test device are attached in this final work.

Keywords: buckling, buckling machine, elastic buckling

SADRŽAJ

1. Uvod 1

1.1. Uvodno o izvijanju i ispitivanju izvijanja 1
1.2. Stanje ravnoteže 2
1.3. Eulerova kritična sila 3
1.3.1. Štap zglobno pričvršćen na oba kraja 4
1.3.2. Štap na jednom kraju pričvršćen, na drugom slobodan (konzola) 4
1.3.3. Štap ukliješten na jednom kraju, a na drugom zglobno vezan 5
1.3.4. Štap ukliješten na oba kraja 6
1.4. Kritično naprezanje i vitkost štapa 6
1.5. Eulerova hiperbola 7
1.6. Izvijanje štapa u plastičnom području 7

2. Projektiranje 10

2.1. Lista zahtjeva i želja 10
2.2. Koncipiranje 12
2.3. Utvrđivanje funkcionalne strukture 12
2.4. Morfološka kutija 13
2.5. Varijanta 1 16
2.6. Varijanta 2 17
2.7. Vrednovanje 18
2.8. Određivanja faktora težine po sustavima ciljeva 18
2.9. Tehničko vrednovanje 20
2.10. Ekonomska dobrota proizvoda 21
2.10.1. Ekonomska dobrota varijante 1 22
2.10.2. Ekonomska dobrota varijante 2 23
2.11. Ukupna dobrota 24

3. Dimenzioniranje naprave 25

3.1. Dimenzioniranje epruvete 25
3.2. Proračun gornje ploče protiv proklizavanja 29

4. Razrada elektroinstalacije i programiranje 32

5. Rezultati testiranja 34

5.1. Rezultati ispitivanja epruvete iz konstrukcijskog čelika EN S 225 34
5.1.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja 35

5.1.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom 35
5.1.3. Epruveta ukliještena na oba kraja 36
5.2. Rezultati ispitivanja epruvete iz aluminija 36
5.2.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja 37
5.2.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom 37
5.2.3. Epruveta ukliještena na oba kraja 38
5.3. Rezultati ispitivanja epruvete iz mjedi 38
5.3.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja 39
5.3.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom 39
5.3.3. Epruveta ukliještena na oba kraja 40
5.4. Rezultati ispitivanja epruveta iz bakra 40
5.4.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja 41
5.4.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom 41
5.4.3. Epruveta ukliještena na oba kraja 42
6. Zaključak 43
7. Literatura 45
8. Prilozi 46

POPIS TABLICA

TABLICA 1.1 FAKTORI SIGURNOSTI ZA RAZLIČITE MATERIJALE 9
TABLICA 2.1 LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA 10
TABLICA 2.2 MORFOLOŠKA KUTIJA 14
TABLICA 2.3 BODOVANJE 19
TABLICA 2.4 TEHNIČKO VREDNOVANJE 20
TABLICA 2.5 EKONOMSKA DOBROTA VARIJANTE 1 22
TABLICA 2.6 EKONOMSKA DOBROTA VARIJANTE 2 23
TABLICA 2.7 ODNOS UKUPNIH DOBROTA 24
TABLICA 3.1 DIMENZIJE EPRUVETA 25
TABLICA 3.2 MEHANIČKA SVOJSTVA ČELIKA EN S 235 26

POPIS SLIKA

SLIKA 1.1 ELEMENT KONSTRUKCIJE OPTEREĆEN PREKOMJERNOM TLAČNOM SILOM 2
SLIKA 1.2 STABILNA, INDIFERENTNA I LABILNA RAVNOTEŽA 3
SLIKA 1.3 ŠTAP ZGLOBNO PRIČVRŠĆEN NA OBA KRAJA 4
SLIKA 1.4 ŠTAP PRIČVRŠĆEN NA JEDNOM KRAJU, A NA DRUGOM SLOBODAN 5
SLIKA 1.5 ŠTAP UKLIJEŠTEN NA JEDNOM KRAJU, A NA DRUGOM ZGLOBNO VEZAN 5
SLIKA 1.6 ŠTAP UKLIJEŠTEN NA OBA KRAJA 6
SLIKA 1.7 ELASTIČNO-PLASTIČNO PODRUČJE 8
SLIKA 2.1 FUNKCIONALNA STRUKTURA UREĐAJA NA IZVIJANJE 13
SLIKA 2.2 VARIJANTA 1 16
SLIKA 2.3 VARIJANTA 2 17
SLIKA 2.4 ODREĐIVANJE TEŽINSKIH FAKTORA 18
SLIKA 2.5 DIJAGRAM TEHNIČKO – EKONOMSKE DOBROTE 24
SLIKA 3.1 DIJAGRAM Σ-Λ ZA ŠTAP KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S235 ZGLOBNO UČVRŠĆEN NA OBA KRAJA 26
SLIKA 3.2 DIJAGRAM Σ-Λ ZA ŠTAP IZ KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S 235 UKLIJEŠTEN NA JEDNOM KRAJU 27
SLIKA 3.3 DIJAGRAM Σ-Λ ŠTAP KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S 235 UKLIJEŠTEN NA JEDNOM KRAJU, ZGLOBNO VEZAN NA DRUGOM KRAJU 27
SLIKA 3.4 DIJAGRAM Σ-Λ ZA ŠTAP KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S 235 UKLIJEŠTEN NA OBA KRAJA 28
SLIKA 3.5 DIJAGRAM $Fkr - L$ ZA SVA ČETIRI SLUČAJA UČVRŠĆENJA ŠTAPA IZ KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S235 28
SLIKA 4.1 SHEMATSKI PRIKAZ PROGRAMSKOG KODA 33
SLIKA 5.1 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA ČELIČNE EPRUVETE ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA OBA KRAJA 35
SLIKA 5.2 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA ČELIČNE EPRUVETE ZGLOBNO UČVRŠĆEN NA JEDNOM KRAJU, A NA DRUGOM UKLIJEŠTEN 35
SLIKA 5.3 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA ČELIČNE EPRUVETE UKLIJEŠTENE NA OBA KRAJA 36
SLIKA 5.4 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ ALUMINIJA ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA OBA KRAJA 37

SLIKA 5.5 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ ALUMINIJA ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA JEDNOM KRAJU, A UKLIJEŠTENE NA DRUGOM 37
SLIKA 5.6 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ ALUMINIJA UKLIJEŠTENE NA OBA KRAJA.....38
SLIKA 5.7 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ MJEDI ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA OBA KRAJA 39
SLIKA 5.8 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ MJEDI ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA JEDNOM KRAJU, A NA DRUGOM UKLIJEŠTENE 39
SLIKA 5.9 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ MJEDI UKLIJEŠTENE NA OBA KRAJA 40
SLIKA 5.10 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ BAKRA ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA OBA KRAJA 41
SLIKA 5.11 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ BAKRA ZGLOBNO UČVRŠĆENE NA JEDNOM, A UKLIJEŠTENE NA DRUGOM KRAJU 41
SLIKA 5.12 DIJAGRAM S REZULTATIMA ISPITIVANJA EPRUVETE IZ BAKRA UKLIJEŠTENE NA OBA KRAJA.....42
SLIKA 6.1 IZRAĐENI UREĐAJ ZA ISPITIVANJE IZVIJANJA.....44

1. Uvod

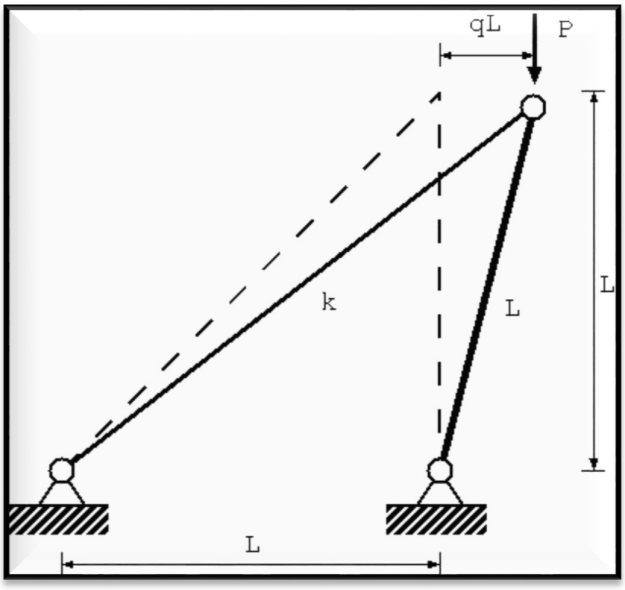
1.1. Uvodno o izvijanju i ispitivanju izvijanja

U ovom radu obrađena je problematika izvijanja od upoznavanja s postojećim edukacijskim napravama za ispitivanje izvijanja do konstruiranja uređaja za demonstraciju elastičnog izvijanja. Uz to izvršena su i mjerenja za vrijeme probi izvijanja, te upoznavanja s različitim metodama izvijanja. U elastičnom području obrađeno je izvijanje za četiri različita slučaja prema načinu učvršćenja epruvete u uređaj za izvijanje.

Izvijanje predstavlja gubitak stabilnosti određenog konstrukcijskog elementa uslijed djelovanja prekomjerne tlačne sile. Uslijed djelovanja velike tlačne sile na epruvetu elemenata dolazi do deformacije svojstvene izvijanju kako prikazuje slika 1.1. Najmanja sila pri kojoj se pojavljuje izvijanje jest kritična sila izvijanja F_k. U stvarnosti izvijanje štapa počinje kada tlačna sila dosegne kritičnu vrijednost. Gubitak stabilnosti pojedinih elemenata događa se iznenada i pri relativno malim naprezanjima, pa je posebno opasna.

Proces izvijanja zauzima važnu ulogu u gotovo svakom polju tehnike. Primjeri elemenata podložnih izvijanju:

- Šipke i podupirači u konstrukciji ili čelične konstrukcije.
- Šipke za pokretanje ventila.
- Klipnjače za hidraulične cilindre.
- Podizna vretena u podiznom stupnju prijenosa.



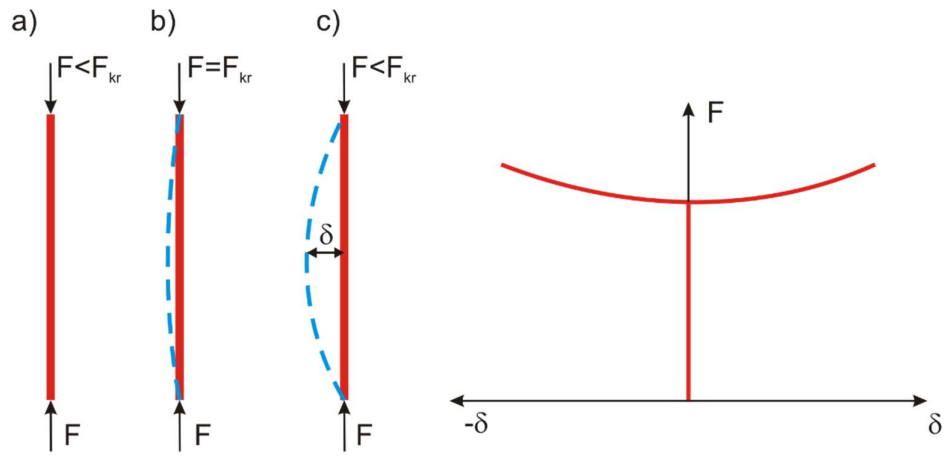
Slika 1.1 Element konstrukcije opterećen prekomjernom tlačnom silom

1.2. Stanje ravnoteže

Deformirani oblik tijela može biti:

- stabilan,
- labilan,
- indiferentan.

Valja uočiti da se dva štapa potpuno istih poprečnih presjeka i jednako opterećenih ali različitih duljina, ponašaju različito. U slučaju da se određeno kruto tijelo pomakne od ravnotežnog položaja moguća su tri ishoda koja su prikazana na slici broj 1.2.



Slika 1.2 Stabilna, indiferentna i labilna ravnoteža

Na slici 1.2 prikazana su tri različita slučaja ravnoteže kod ispitivanja izvijanja štapova:

a) ravnotežni položaj štapa - **stabilna ravnoteža** $F<F_{kr}$
b) štap je još uvijek u ravnoteži, tj. nema većih deformacija **- indiferentna ravnoteža** $F=F_{kr}$
c) povećanjem sile iznad kritične deformacije štapa postaju sve veće **- labilna ravnoteža** $F>F_{kr}$

1.3. Eulerova kritična sila

1774. godine Leonhard Euler prvi je proučavao stabilnost štapa aksijalno opterećenog na tlak. Uveo je izraz za kritičnu silu, gdje je pokazao da ista ovisi o načinu učvršćenja krajeva štapa, duljini štapa, obliku i površini poprečnog presjeka te o materijalu iz kojeg je štap izrađen. Eulerova metoda sastoji se u određivanju sile na temelju koje može doći do kritične vrijednosti iznad koje se štap elastično deformira.

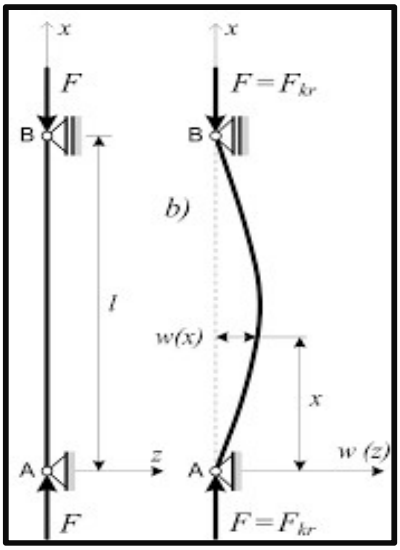
Postoje više osnovnih slučajeva izvijanja štapa s obzirom na način učvršćivanja krajeva štapa kao na primjer:

1. štap zglobno učvršćen na oba kraja,
2. štap ukliješten na jednom kraju, a na drugom kraju je slobodan (konzola),
3. štap ukliješten na jednom kraju, a na drugom zglobno vezan,
4. štap ukliješten na oba kraja.

1.3.1. Štap zglobno pričvršćen na oba kraja

Štap zglobno pričvršćen na oba kraja prikazan je na slici 1.3. Ako je aksijalna tlačna sila $F<F_{kr}$, štap ostaje deformiran. Ukoliko sila F dostigne kritičnu vrijednost F_{kr}, štap se elastično deformira. Euloreva kritična sila za štap zglobno pričvršćen na oba kraja glasi:

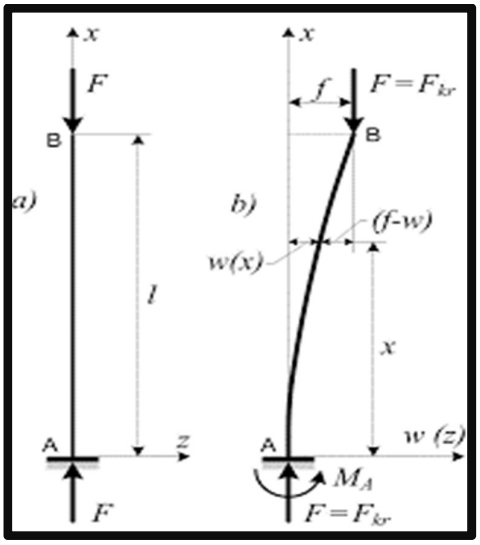
$$F_{kr} = \frac{\pi^2}{l^2} EI_{min} \tag{1.1}$$



Slika 1.3 Štap zglobno pričvršćen na oba kraja

1.3.2. Štap na jednom kraju pričvršćen, na drugom slobodan (konzola)

Štap na jednom kraju pričvršćen a na drugom kraju slobodan prikazan je na slici 1.4. Pri ovom slučaju koriste se znatno manje sile da bi došlo do izvijanja štapa. Kritična sila za ovaj slučaj prikazana je formulom (1.2.)

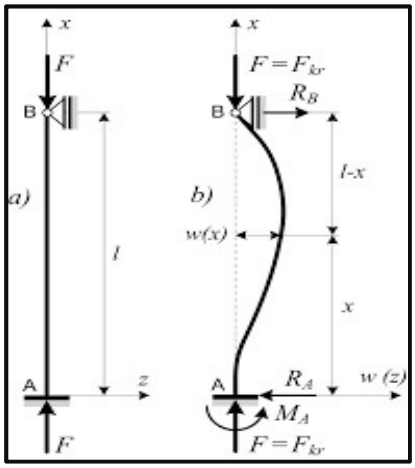


Slika 1.4 Štap pričvršćen na jednom kraju, a na drugom slobodan

$$F_{kr} = \frac{\pi^2}{4l^2} EI_{min} \tag{1.2}$$

1.3.3. Štap ukliješten na jednom kraju, a na drugom zglobno vezan

Štap koji je na jednom kraju ukliješten, a na drugom zglobno vezan prikazan je na slici 1.5. Kada sila *F* dostigne kritičnu vrijednost, dolazi do elastične deformacije štapa tj. izvijanja. Kod pojave izvijanja štapa pojavljuje se reakcija u uklještenju *A* i zglobu *B,* te moment u uklještenju *A*.



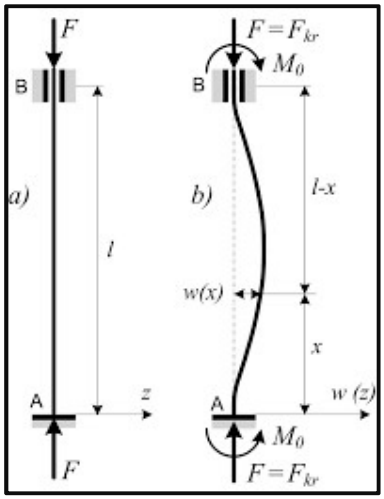
Slika 1.5 Štap ukliješten na jednom kraju, a na drugom zglobno vezan

$$F_{kr} \approx 2\,\frac{\pi^2}{l^2} EI_{min} \tag{1.3}$$

1.3.4. Štap ukliješten na oba kraja

Pretpostavljeno je da štap ima simetričan oblik izvijanja, veličina momenta M_0 jednaka je na oba kraja. Na mjestima uklještenja pojavljuje se reaktivni moment što je vidljivo na slici 1.6. Moment savijanja duž štapa može se odrediti na temelju izraza:

$$M(x) = F \cdot w(x) + M_0 \tag{1.4}$$



Slika 1.6 Štap ukliješten na oba kraja

$$F_{kr} = \frac{4EI_{min}\pi^2}{l^2} \tag{1.5}$$

1.4. Kritično naprezanje i vitkost štapa

Iz kritične sile možemo dobiti kritično naprezanje izvijanja:

$$\sigma_{kr} = \frac{F_{kr}}{A} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{l_i^2 A} \tag{1.6}$$

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \tag{1.7}$$

Izraz (1.7) pokazuje da kritično naprezanje ovisi o svojstvu materijala tj. modulu elastičnosti *E* i vitkosti štapa λ te načinu učvršćenja štapa.

Vitkost štapa je odnos između slobodne dužine izvijanja i minimalnog polumjera inercije poprečnog presjeka.

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{min}} \tag{1.8}$$

1.5. Eulerova hiperbola

Ovisnost između kritičnog naprezanja i vitkosti štapa prikazana je Eulerovom hiperbolom na slici 1.7. Ukoliko je vitkost štapa velika, kritično naprezanje teži k nuli. Vrlo vitki štapovi izvijaju se i pri najmanjem opterećenju. Smanjenjem vitkosti štapa kritično naprezanje raste.

Eulerovi izrazi za kritičnu silu i kritično naprezanje utemeljeni su na Hookeovom zakonu. To znači da izrazi (1.1) - (1.7) vrijedi samo za kritično naprezanje koje ne prelazi granicu proporcionalnosti pri jednoosnom naprezanju, tj. kada je:

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_p \tag{1.9}$$

ili

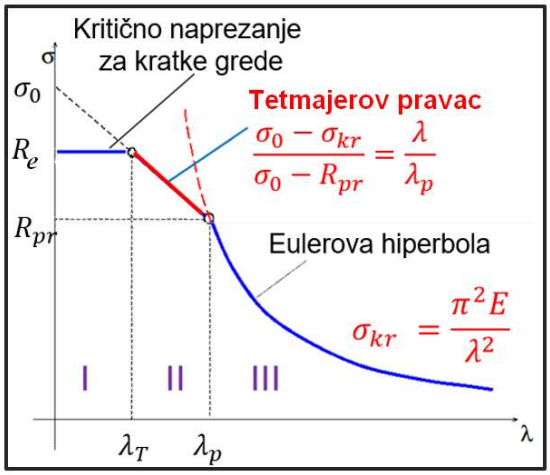
$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} = \lambda_p \tag{1.10}$$

λ_p-granična vitkost, Eulerovi izrazi za kritičnu silu izvijanja ne vrijede. Proizlazi da se štapovi velike vitkosti $\lambda > \lambda_p$ izvijaju u elastičnom području, dok se štapovi srednjih vitkosti $\lambda_T < \lambda < \lambda_p$ izvijaju u plastičnom području kao što pokazuje slika 1.7. Za vrlo niske vitkosti $\lambda < \lambda_T$ ne dolazi do pojave izvijanja.

1.6. Izvijanje štapa u plastičnom području

Iz dijagrama koji prikazuje slika 1.7 kod štapova male vitkosti kritično naprezanje stalno raste tako da pri određenoj vitkosti prelazi naprezanje granice proporcionalnosti, stoga izraz za Eulerovu kritičnu silu izvijanja više nije mjerodavan.

Proračun izvijanja u plastičnom području prvi je istražio Tetmayer koji je za vezu između kritičnog naprezanja i vitkosti štapa pretpostavio linearnu ovisnost, te se stoga pravac u dijagramu naziva Tetmayerov pravac.



Slika 1.7 Elastično-plastično područje

a) kratki štapovi – proračunavanje štapova na tlačnu čvrstoću, izvijanje se ne uzima u obzir ($\lambda \leq \lambda_T$), (vidi sliku 1.7)
b) srednje dugi štapovi – štapovi se proračunavaju prema Tetmajerovom izrazu $(\sigma_{kr} = \sigma_o - (\sigma_o - \sigma_p)\frac{\lambda}{\lambda_p})$, (vidi sliku 1.7)
c) vitki štapovi – štapovi se proračunavaju prema Eulerovom izrazu $(\sigma_{kr} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2})$, (vidi sliku 1.7)

Dopušteno tlačno naprezanje za slučaj izvijanja određuje se prema izrazu:

$$\sigma_{dop} = \sigma_{kr}/S \qquad (1.11)$$

gdje je:

S - faktor sigurnosti

σ_{kr} - kritično naprezanje kod kojeg dolazi do pojave izvijanja

Faktori sigurnosti *S* za različite materijale prikazani su u tablici 1.1.

Tablica 1.1 Faktori sigurnosti za različite materijale

Materijal	Faktor sigurnosti
Čelik	1.5 - 3
Lijevano željezo	4.5 - 5.5
Drvo	2.5 - 3.5

2. Projektiranje

2.1. Lista zahtjeva i želja

Prije samog razvoja proizvoda potrebno je prikupiti informacije o zahtjevima koji moraju biti ispunjeni konstrukcijskim rješenjem, ali isto tako i ograničenjima konstrukcijskog rješenja. Slijedom toga potrebno je izraditi listu zahtjeva koja sadrži:

- zahtjeve koji obavezno trebaju biti ispunjeni, te navesti minimalne zahtjeve,
- želje koje se klasificiraju po značaju i usklađuju s troškovima.

Listu zahtjeva tijekom rješavanja problema po potrebi treba nadopuniti te ispraviti. U tablici 2.1. prikazana je lista zahtjeva i želja.

Tablica 2.1 Lista zahtjeva i želja

LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA EDUKACIJSKA NAPRAVA ZA ISPITIVANJE IZVIJANJA			STRANA STRANA UK.
DATUM IZMJENA	ZAHTJEV ŽELJA	ZAHTJEVI	ODGOVORAN
	Z	Dimenzije uređaja h=400 mm, v=715 mm, b=250 mm max (maksimalne dimenzije)	
	Z	Ispitivanje profila pravokutnog poprečnog presjeka	
	Ž	Ispitivanje epruveta okruglog poprečnog presjeka	
	Z	Pogon uređaja; mehanička energija, električna energija	
	Z	Ispitivanje epruveta od čistih metala i legura	
	Z	Mogućnost ispitivanja epruveta različitih duljina	
	Ž	Ispitivanje epruveta različitih dimenzija poprečnog presjeka	

	Z	Brzo i jednostavno učvršćenje i zamjena epruvete	
	Z	Jednostavna zamjena prihvata epruvete (stezaljke)	
	Z	Računalna pohrana podataka ispitivanja	
	Z	Uređaj opremiti senzorima za mjerenje sile i bočnog pomaka	
	Z	Vrsta opterećenja - izvijanje	
	Ž	Signal za uključenje i isključenje uređaja	
	Ž	Automatsko isključivanje u slučaju preopterećenja ili prevelike bočne deformacije	
	Z	Rukovanje mora biti jednostavno i pogodno za manipulaciju jednog korisnika	
	Z	Pouzdanost i preglednost uređaja	
	Ž	Uređaj mora biti mobilan (lako prenosiv)	
	Ž	Mala razina buke	
	Ž	Jednostavna zamjena istrošenih dijelova	
	Z	Prikazati rezultate ispitivanja	
	Z	Maksimalna cijena uređaja 8000 kn	
	Z	Datum završetka razvoja	

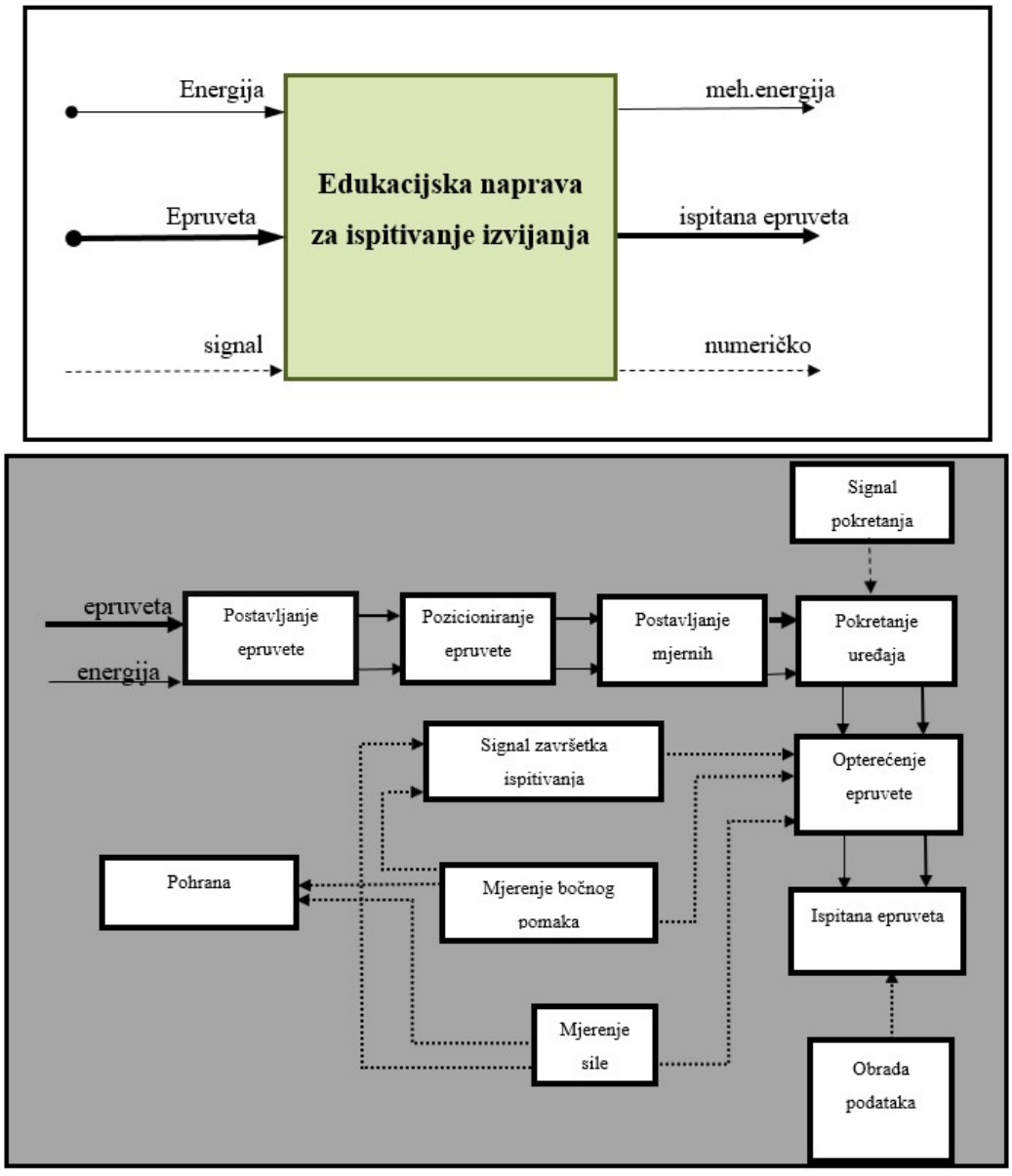
Osnovna namjena naprave za izvijanje je edukacija studenata u okviru laboratorijskih vježbi te ispitivanje značajki izvijanja materijala nepoznatog sastava. Optimalno konstrukcijsko rješenje podrazumijeva korištenje što većeg broja standardnih dijelova. Korištenjem standardnih dijelova smanjuju se troškovi izrade te se postiže niža cijena održavanja proizvoda.

2.2. Koncipiranje

Prije početka rada na koncipiranju proizvoda potrebno je voditi računa o popratnim situacijama kao što je mogućnost potrebe dodatnih podataka, stupanj riješenosti samog zadatka ili pak postojanje mogućnosti preskakanja izvođenja faze koncipiranja, jer je istu moguće utvrditi na temelju postojećih rješenja. Faza koncipiranja od velike je važnosti s obzirom da se njome postavlja funkcionalna struktura, izdvajaju problemi te se utvrđuje radna struktura. Produkt faze koncipiranja jest koncepcija tehničke tvorevine. U samoj fazi koncipiranja vrlo je važno savjesno provođenje postupka s obzirom da se greške i propusti koji su nastali, kasnije mogu teško popraviti. Potrebno je ponuditi nekoliko varijanti rješenja, te iste vrednovati na osnovi tehničkih kriterija, a približno i na osnovi ekonomskih kriterija. U svrhu postizanja optimalnog rješenja poželjno je ispitati mogućnost nekih naprednijih rješenja te na kraju odabrati najbolju varijantu

2.3. Utvrđivanje funkcionalne strukture

Kod utvrđivanja funkcionalne strukture potrebno je odrediti, odnosno postaviti glavnu funkciju koja predstavlja stup funkcionalne strukture, a zatim paralelno s glavnom funkcijom razviti i sporedne funkcije, te sve zajedno raščlaniti na parcijalne funkcije manje složenosti. Proces utvrđivanja funkcionalne strukture vrlo je važan kod novih konstrukcija jer su važni elementi i veze još uvijek nepoznati. Shema funkcionalne strukture prikazana je na slici 2.1.

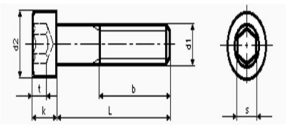
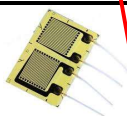


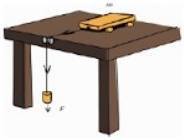
Slika 2.1 Funkcionalna struktura uređaja na izvijanje

2.4. Morfološka kutija

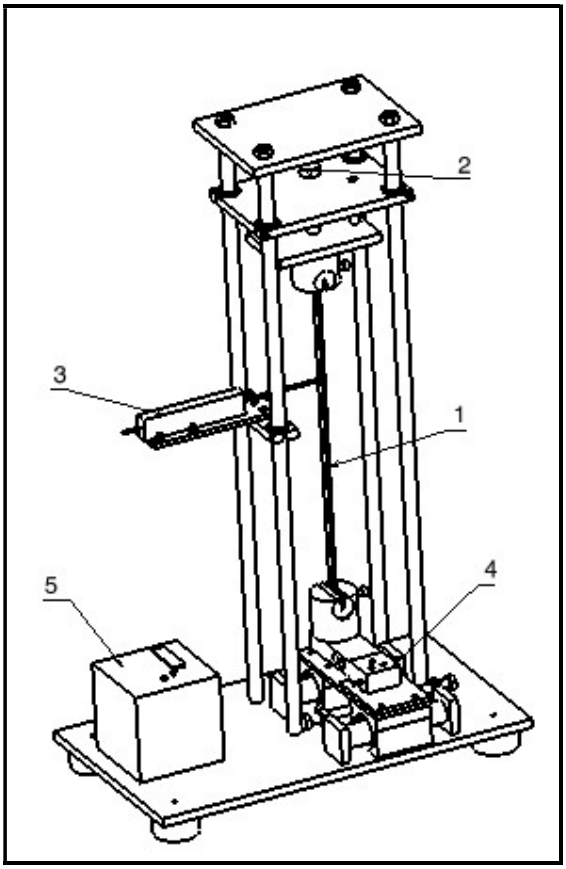
Radne principe koji zadovoljavaju parcijalne funkcije treba kombinirati na način da se dobije radna struktura. Osnovu za takvo spajanje čini postavljena funkcionalna struktura. Metodičko kombiniranje pomoću sustava kvalifikacije nazivamo morfološka kutija. To je tablica u čijim su recima parcijalne funkcije, a u stupcima varijante rješenja. Morfološka kutija ovog uređaja prikazana je u tablici 2.2. U praksi će se razmatrati samo nekoliko najpovoljnijih kombinacija, budući da će ostale biti nepraktične.

Tablica 2.2 Morfološka kutija

Redni broj	Parcijalna funkcija	Rješenja		
		1.	2.	3.
1.	Postavljanje epruvete	Ručno		
2.	Učvršćenje epruvete	 Učvršćenje oblikom (imbus vijak)	Pneumatska stezaljka	
3.	Izvijanje epruvete (ostvarivanje sile)	Pomoću utega	 Hidraulična pumpa	 Pomoću ključa
4.	Mjerenje sile	 Senzor tlaka	 Dinamovaga	  Tenzometrijska traka (vaga)

5.	Mjerenje bočnog pomaka	 Komparator	 Infracrveni senzor blizine kratkog dometa	 Promjenjivi linearni otpornik
6.	Očitavanje bočnog pomaka	Ručno	 Digitalni displej	 Eksterna memorija
7.	Iniciranje bočnog pomaka	 Uteg		

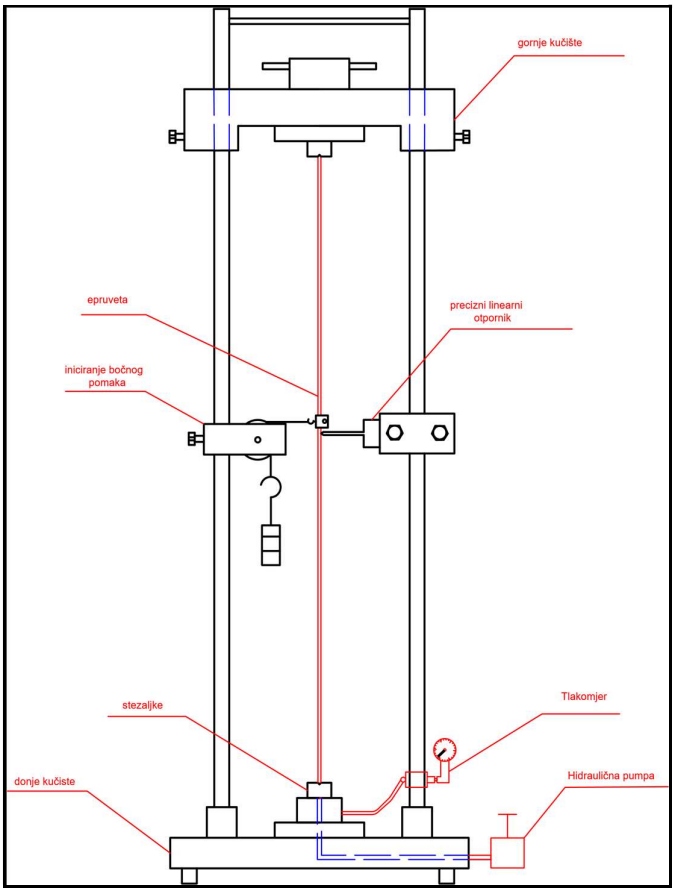
2.5. Varijanta 1



Slika 2.2 Varijanta 1

Epruveta za ispitivanje (1) ručno je namještena na uređaj. Prije početka rada na uređaju namještamo odgovarajuće parametre (visina epruvete, način uklještenja). U ovoj varijanti ostvarivanje tlačne sile vrši se pomoću vijka (2). Vijak se nalazi na pomičnoj ploči koja se pritezanjem pomoću četiri vijka osigurava od proklizavanja. Zakretanjem vijka vrši se povećanje tlačnog opterećenja do neke maksimalne vrijednosti kada dolazi do pojave izvijanja. Na vodilicama se nalazi promjenjivi linearni otpornik (3) koji je zadužen za očitavanje bočnog pomaka. Promjenjivi linearni otpornik ima mogućnost pomicanja u vertikalnom smjeru kako bi mogli izmjeriti bočni pomak epruveta manjih dimenzija. Na donjem dijelu uređaja nalazi se vaga (4). Osnovna namjena vage je očitavanje sile kojom se vrši izvijanje. Dinamovaga je spojena na uređaj za zapisivanje podataka na eksternu memoriju kako bi se registrirale vrijednosti sila za vrijeme ispitivanja. Sve trenutne podatke moguće je očitati na upravljačkoj kutiji (5). Upravljačka kutija spojena je s dinamo vagom (2) i linearnim potenciometrom (3) preko arduino mikrokontrolera. Skica varijanta 1 prikazana je na slici 2.2.

2.6. Varijanta 2



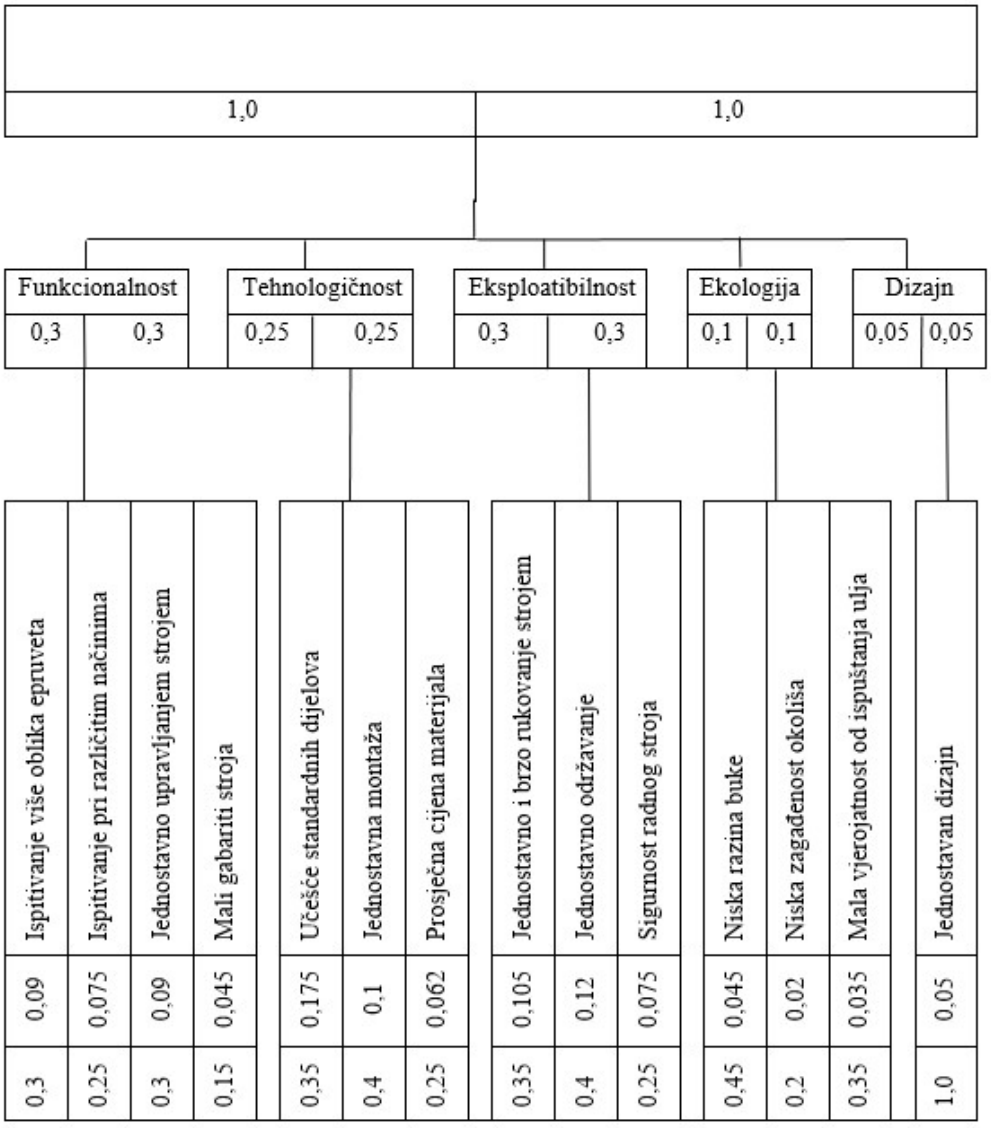
Slika 2.3 Varijanta 2

Epruveta za ispitivanje (1) ručno je namještena i fiksirana za napravu, odnosno pričvršćena je za gornje i donje stezaljke (2) ovisno o načinu uklještenja. Stezaljke (2) su prethodno učvršćene vijkom te imaju mogućnost jednostavne zamjene. Pomoću hidraulične pumpe (3) ostvarena je sila potrebna za izvijanje epruvete (1). Prije početka izvijanja svi mjerni uređaji su na nuli, odnosno na početnom položaju. Tlačna sila na epruvetu vrši se pomoću hidraulične pumpe (3). Regulacijom povećanja sile određuje se stupanj izvijanja. Mjerenje sila koje nastaju prilikom izvijanja očitavaju se pomoću senzora tlaka (4) koji predočava podatke o veličini sile. Na samom uređaju, nalazi se i uteg (5), koji inicira željeni smjer izvijanja. Na jednoj od vodilica nalazi se promjenjivi linearni otpornik (6), a njegova osnovna namjena jest očitavanje bočnog pomaka. Promjenjivi linearni otpornik (6) spojen je sa eksternom memorijom, te su na digitalnom displeju prikazani podaci bočnog izvijanja. Sami uređaj sastoji se od gornjeg i donjeg kućišta i kao što je prikazano na slici 2.3.

2.7. Vrednovanje

Proces vrednovanja služi za utvrđivanje vrijednosti ili dobrote određenog rješenja u odnosu na zadani cilj. Postupci vrednovanja koriste se za procjenu rješenja u bilo kojoj fazi konstruiranja, a postavljanje ciljeva vrši se na temelju liste zahtjeva i želja. Svako svojstvo ima svoju ulogu u ukupnom rješenju. Koja svojstva imaju prednost nad drugim svojstvima, odnosno koja svojstva odabrati, konkretizira se pomoću liste zahtjeva. Koliko je neko svojstvo dobro tj. koliko je ispunjen neki kriterij, određuje se bodovima. Na idućoj slici prikazan je primjer bodovanja.

2.8. Određivanja faktora težine po sustavima ciljeva



Slika 2.4 Određivanje težinskih faktora

Tablica 2.3 Bodovanje

Svojstvo je:	*Broj bodova*
Nezadovoljavajuće	0
Prolazno	1
Zadovoljavajuće	2
Dobro	3
Izvrsno	4

Određivanje dobrote pojedinih varijanti vrši se sustavom bodovanja prema slici 2.4 i tablici 2.3, čime se određuje koja varijanta je najbolja, odnosno stupanj „dobrote“ ili „stupanj savršenosti“. To se može učiniti na nekoliko načina:

1. sva svojstva tehničkog rješenja imaju isti značaj- **ukupna nevagana dobrota**
2. određena svojstva imaju veći ili manji značaj, imaju i veći odnosno manji faktor težine- **ukupna vagana dobrota**
3. dijeljenjem ukupne nevagane dobrote s najvećom mogućom dobrotom pri čemu sva svojstva imaju isti značaj- **ukupna nevagana apsolutna dobrota**
4. dijeljenjem ukupne vagane dobrote s najvećom mogućom dobrotom, a svojstva se „važu“ – **ukupna vagana apsolutna dobrota**

2.9. Tehničko vrednovanje

Tablica 2.4 Tehničko vrednovanje

Vrednovanje pri izradi edukacijske naprave za ispitivanje izvijanja Bodovanje V_i = 0-4						
Kriterij	**Svojstvo**	g_i	**VARIJANTA 1**		**VARIJANTA 2**	
			V_i	Vagana vrijednost $(V_i*g_i)_1$	V_i	Vagana vrijednost $(V_i*g_i)_2$
Funkcionalnost	Ispitivanje više oblika epruveta	0,09	3	0,27	3	0,27
	Mali gabariti stroja [dimenzije]	0,075	4	0,3	4	0,3
	Ispitivanje pri različitim načinima uklještenja	0,09	4	0,36	4	0,36
	Mala masa	0,045	4	0,18	3	0,135
Tehnologičnost	Učešće standardnih dijelova	0,175	4	0,7	3	0,525
	Jednostavna montaža	0,1	4	0,4	4	0,4
	Prosječna cijena materijala	0,062	3	0,186	2	0,124
Eksploatacija	Jednostavno i brzo rukovanje strojem	0,105	4	0,42	3	0,315
	Jednostavno održavanje zamjena epruveta čišćenje stroja	0,12	4	0,48	4	0,48
	Sigurnost radnog mjesta	0,075	3	0,225	3	0,225
Ekologija	Niska razina buke	0,045	3	0,135	3	0,135
	Niska zagađenost okoliša	0,02	3	0,06	3	0,06
	Mala vjerojatnost od ispuštanja ulja	0,035	3	0,105	3	0,105
Dizajn	Jednostavan izgled stroja	0,05	2	0,1	4	0,2
	$\sum v_i = V$		56		54	
	$V_g = \sum(g_i*v_i)$		3,921		3,634	
	$V_{g\ aps} = V_g/4$		0,98		0,908	

Detaljni postupak tehničkog vrednovanja obje varijante je prikazan u tablici 2.4.

Orijentacijski se može uzeti za ukupnu apsolutnu vaganu vrijednost:

$$V_{gaps} \geq 0{,}85 - povoljno$$

$$V_{gaps} \approx 0{,}7 - upotrbljivo$$

$$V_{gaps} < 0{,}6 - nepovoljno$$

2.10. Ekonomska dobrota proizvoda

Cijena koju je spreman ponuditi kupac:

$$C_k = 6000\ kn \tag{2.1}$$

Cijena bez PDV-a:

$$\mathrm{C} = \frac{C_k}{1{,}25} = 4800\ kn \tag{2.2}$$

Troškovi distributera 10 %.

Cijena po kojoj proizvođač daje proviziju:

$$C_p = \frac{C}{1{,}1} = 4363{,}63\ kn \tag{2.3}$$

Zarada proizvođača 10 %:

$$C_{neto} = \frac{C_p}{1{,}1} = 3966{,}93\ kn \tag{2.4}$$

Dodatni troškovi izrade:

$$H_{dop} = \frac{C_{neto}}{1{,}3} = \ 3051{,}48\ kn \tag{2.5}$$

Idealni troškovi proizvodnje:

$$H_{ide} = 0{,}75 * \ H_{dop} = 0{,}75 * 3051{,}48 = 2288{,}61\ kn \tag{2.6}$$

2.10.1. Ekonomska dobrota varijante 1

Tablica 2.5 Ekonomska dobrota varijante 1

EKONOMSKA DOBROTA						
NAPRAVA ZA IZVIJANJE						
VARIJANTA 1						
		Standardni dijelovi	Materijal	Izrada	Montaža	Ukupno
1.	Kućište 2 kom		200 kn	100 kn	50 kn	350 kn
2.	Osovine 4 kom		100 kn	200 kn	50 kn	350 kn
3.	Upravljačka kutija		100 kn	100 kn	50 kn	250 kn
4.	Vijak	20 kn			50 kn	70 kn
5.	Hvatište 8 kom (stezaljke)		200 kn	200 kn	100 kn	500 kn
6.	Precizni linearni otpornik	1000 kn			100 kn	1100 kn
7.	Arduino UNO	600 kn			100 kn	700 kn
8.	Ispitne epruvete 8 kom	100 kn				100 kn
9.	Senzor sile	100 kn			50 kn	150 kn
10.	Digitalni čitač	100 kn			50 kn	150 kn
						Σ = 3720 kn

Ekonomska dobrota varijante 1:

$$y = \frac{H_{ide}}{H} = \frac{2281,61}{3720} = 0,61 \qquad (2.7)$$

Ekonomsko vrednovanje varijante 1 je detaljno prikazano u tablici 2.5.

2.10.2. Ekonomska dobrota varijante 2

Tablica 2.6 Ekonomska dobrota varijante 2

EKONOMSKA DOBROTA						
NAPRAVA ZA IZVIJANJE						
VARIJANTA 2						
		Standardni dijelovi	Materijal	Izrada	Montaža	Ukupno
1.	Kućište x2		200 kn	100 kn	50 kn	350 kn
2.	Osovine x2		100 kn	200 kn	50 kn	350 kn
3.	Uteg x3		100 kn	100 kn	50 kn	250 kn
4.	Držač utega	50 kn		50 kn	50 kn	150 kn
5.	Hidraulična pumpa	1100 kn			100 kn	1200 kn
6.	Hvatišta x8 (stezaljke)		200 kn	200 kn	100 kn	500 kn
7.	IR senzor	200 kn			50 kn	250 kn
8.	Ispitne epruvete X8	100 kn				100 kn
9.	Ostali materijal	200 kn		100 kn	50 kn	350 kn
10.	Upravljačka kutija		100 kn	100 kn	50 kn	250 kn
11.	Arudino UNO	600 kn			100 kn	700 kn
						Σ = 4450 kn

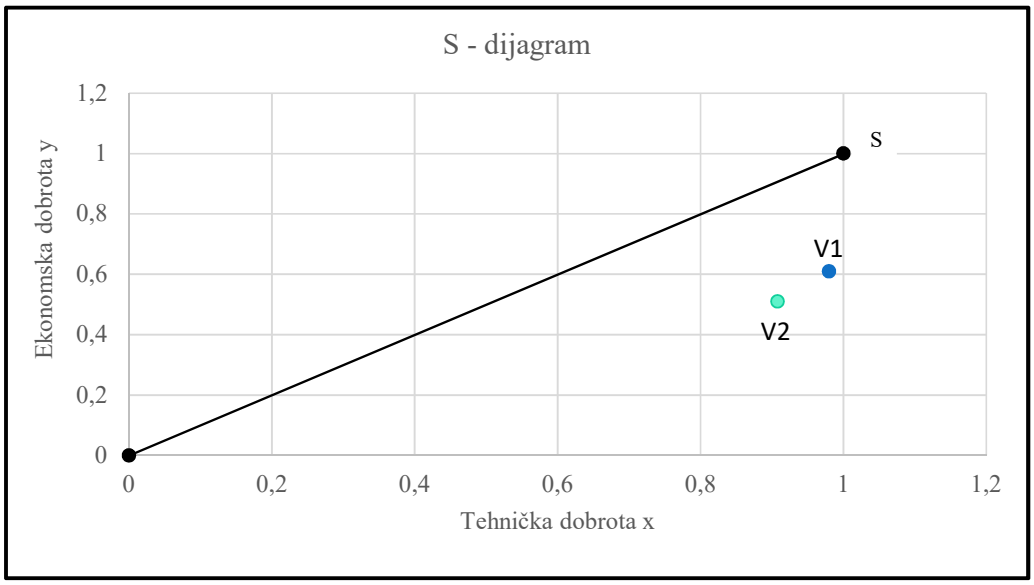
Ekonomska dobrota varijante 2:

$$y = \frac{H_{ide}}{H} = \frac{2281,61}{4450} = 0,51 \quad (2.8)$$

Ekonomsko vrednovanje varijante 2 je detaljno prikazano u tablici 2.6.

2.11. Ukupna dobrota

U S - dijagramu koristi se grafički prikaz tehničko - ekonomske dobrote.



Slika 2.5 Dijagram tehničko – ekonomske dobrote

Tehnička dobrota proizvoda unosi se na os x, dok se ekonomska dobrota proizvoda unosi na os y. Ukupna dobrota proizvoda definirana je točkom S i smatra se idealnim rješenjem, međutim idealno rješenje je gotovo pa nemoguće postići. Iz slike 2.5 vidi se da je varijanta 1 najbliža idealnom rješenju tj. ima veću ukupnu dobrotu S, te se varijanta 1 uzima kao konačno rješenje. Odnos dviju varijanti ukupnih dobara prikazan je u tablici 2.7.

Tablica 2.7 Odnos ukupnih dobrota

VARIJANTA 1	x_1	0.98	$d_1 = \sqrt{x_1 \cdot y_1}$ $d_1 = 0{,}773$
	y_1	0.61	
VARIJANTA 2	x_2	0.908	$d_2 = \sqrt{x_2 \cdot y_2}$ $d_2 = 0{,}68$
	y_2	0.51	

3. Dimenzioniranje naprave

Proračun izvijanja korišten je prije svega u svrhu dobivanja važnih podataka kao što su kritična sila, kritično naprezanje i vitkost štapa za pojedine vrste uklještenja. Ovi podaci važni su zbog dimenzioniranja i odabira standardnih komponenti- potrebnih za izradu uređaja za ispitivanje izvijanja. Na temelju podataka dobivenih proračunom kreirani su različiti dijagrami izvijanja iz kojih se pregledno vide svi potrebni podaci. U samom proračunu korišteni su podaci za konstrukcijski čelik oznake prema EN S 235. Odabrani materijal koristi se za izradu čeličnih konstrukcija, sastavnih dijelova strojeva, aparata i slično. Konstrukcijski čelici u pravilu sadrže manje od 0, 6% ugljika. Valja napomenuti granice koje određuju u koje područje ulaze ispitne epruvete. U intervalu 0-70, gdje spadaju tzv. kratki štapovi, nalaze se u području „gnječenja“, 70-105 tzv. srednje dugi štapovi, nalaze se u području Tetmayera (plastično područje), a vitkost štapa 105 > nalaze se u području Eulera (elastično područje) kao što je prikazano u slikama 9., 10., 11., 12.. Na prikazanoj tablici 3.1 vidljive su dimenzije epruveta.

3.1. Dimenzioniranje epruvete

Tablica 3.1 Dimenzije epruveta

L - duljina epruvete	5 - 500 mm
b - širina epruvete	20 mm
h - debljina epruvete	3 mm
E - Youngov modul	210 GPa
I - moment inercije	45 mm^4

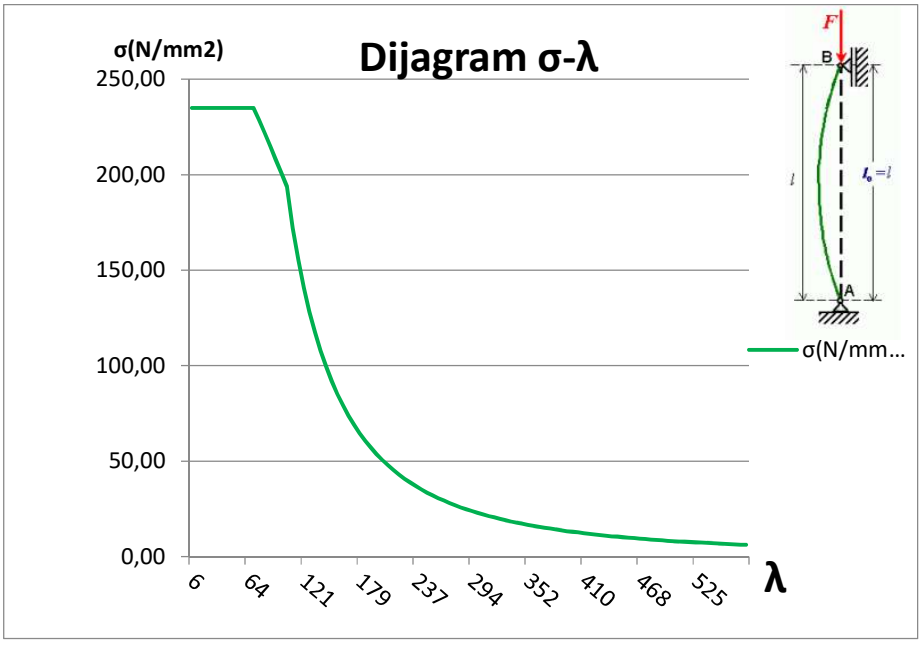
Inicijalne dimenzije epruvete prikazane su u tablici 3.1.

Tablica 3.2 Mehanička svojstva čelika EN S 235

R_{pr} – granica proporcionalnosti	200 MPa
R_p – granica tečenja	235 MPa
σ_0 – karakteristično naprezanje	320 MPa

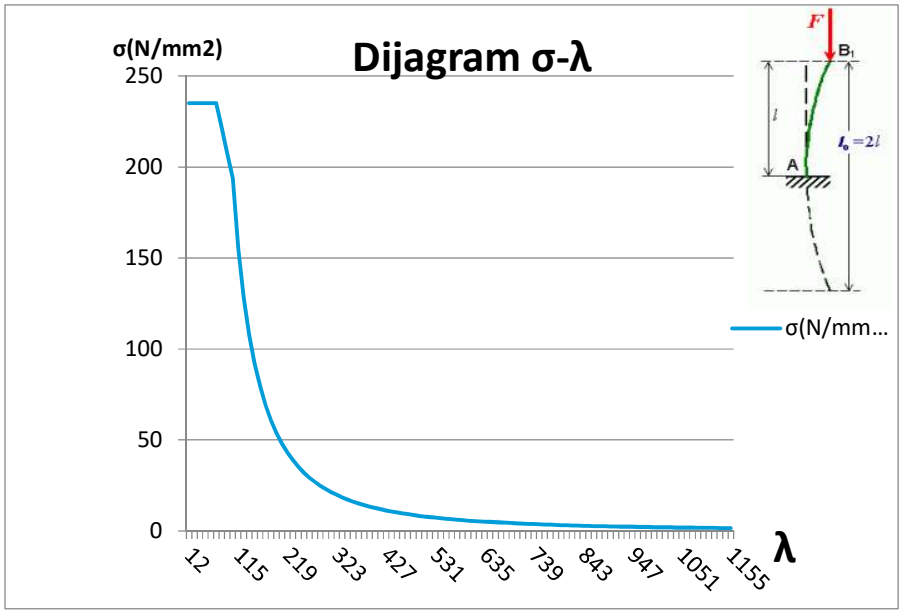
Mehanička svojstva odabranog materijala za izradu epruvete su prikazana u tablici 3.2.

U prikazanim dijagramima jasno se vide podaci za pojedinu vrstu učvršćenja. U dijagramu na slici 3.1 prikazana je krivulja ovisnosti kritične sile o vitkosti za slučaj zglobnog učvršćeno štapa na oba kraja.

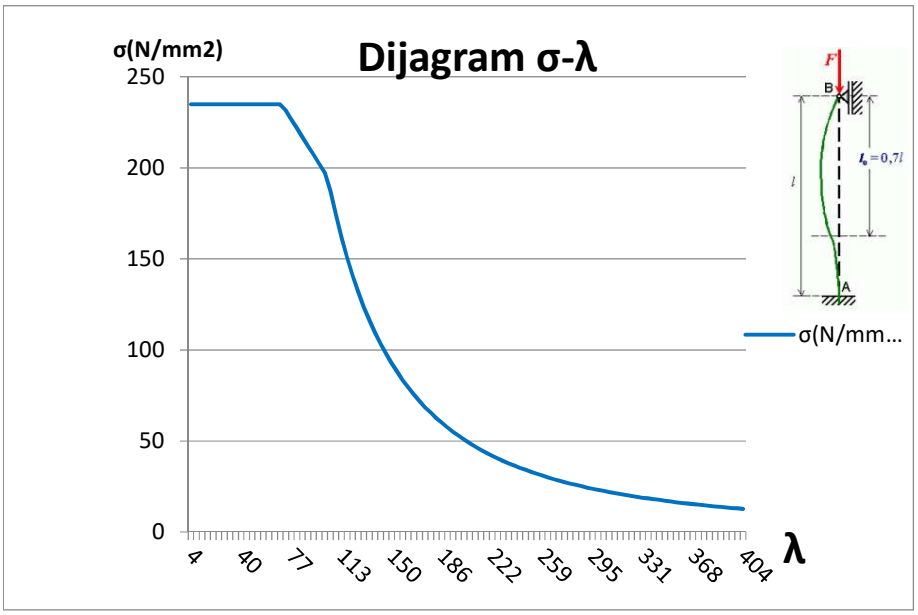


Slika 3.1 Dijagram σ-λ za štap konstrukcijskog čelika S235 zglobno učvršćen na oba kraja

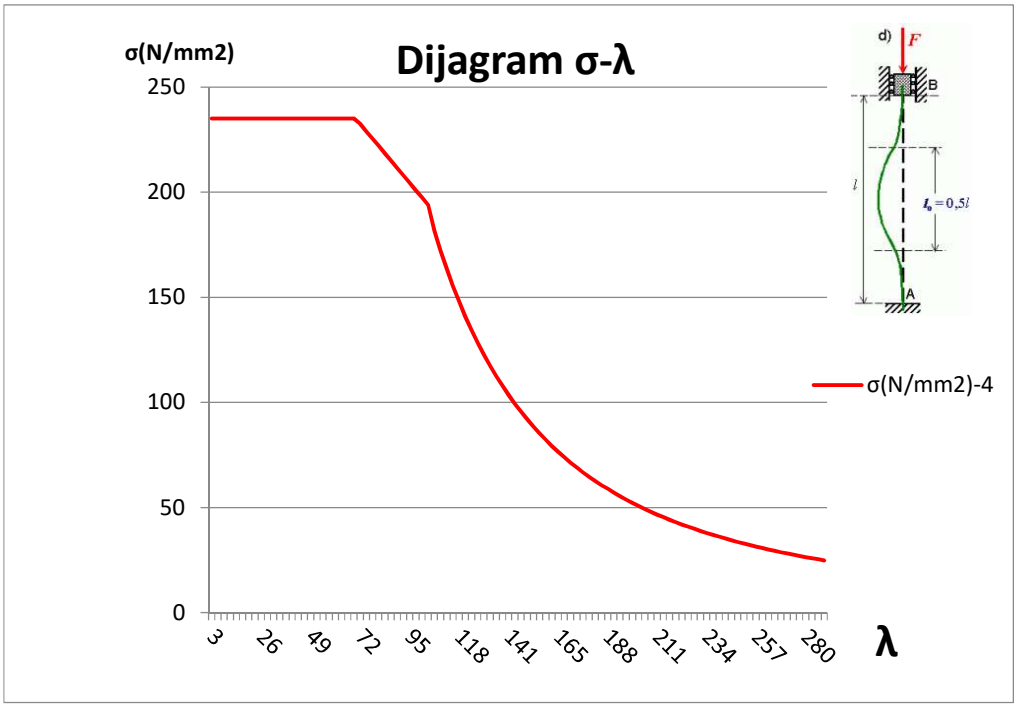
U dijagramu na slici 3.2 prikazana je krivulja za slučaj ukliještenog štapa na jednom kraju, na slici 3.3 prikazuje krivulju za slučaj ukliještenog jednog kraja, dok je drugi kraj štapa zglobno učvršćen. Na slici 3.4 prikazana je krivulja za slučaj kada su oba kraja ukliještena.



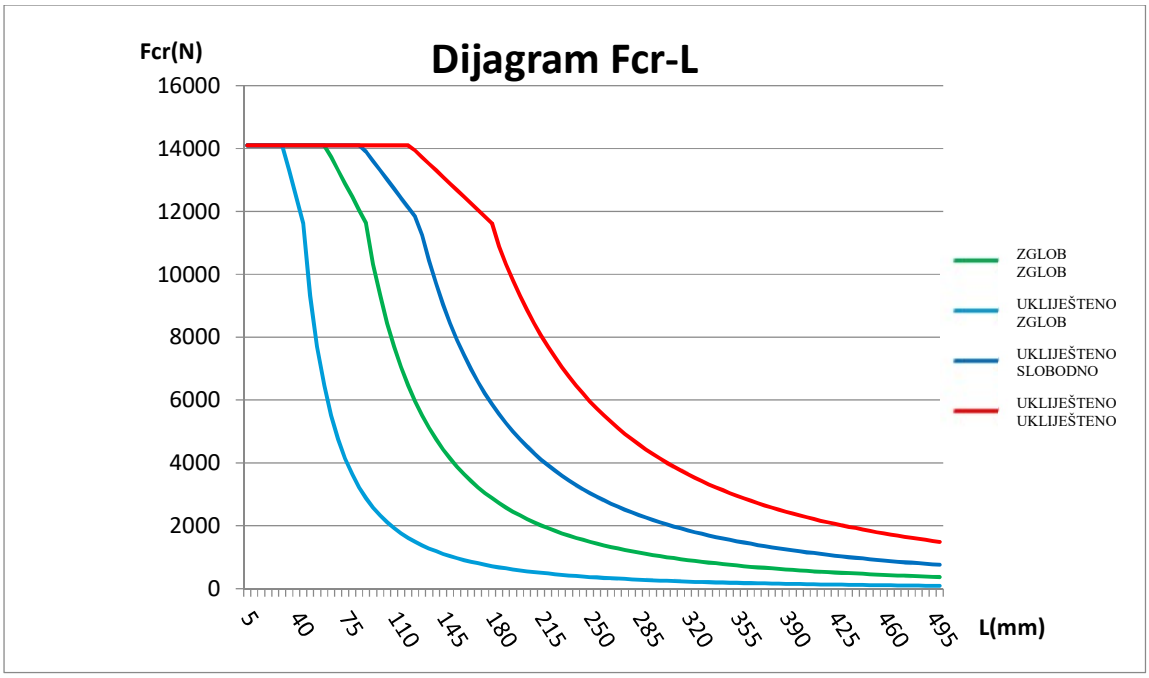
Slika 3.2 Dijagram σ-λ za štap iz konstrukcijskog čelika S 235 ukliješten na jednom kraju



Slika 3.3 Dijagram σ-λ štap konstrukcijskog čelika S 235 ukliješten na jednom kraju, zglobno vezan na drugom kraju



Slika 3.4 Dijagram σ-λ za štap konstrukcijskog čelika S 235 ukliješten na oba kraja



Slika 3.5 Dijagram $F_{kr} - L$ za sva četiri slučaja učvršćenja štapa iz konstrukcijskog čelika S235

Iz dijagrama na slici 3.5. jasno se vidi kako različiti načini uklještenja kod ispitnih epruveta istih dimenzija utječu na veličinu kritične sile izvijanja. Valja napomenuti slučaj štapa uklještenog na jednom kraju, prikazan na slici 3.2., kod kojeg se epruveta vrlo male duljine (40 mm) izvija u Eulerovom elastičnom području. Kod ostalih načina učvršćenja štapa, za ovako male duljine štapa dolazi do pojave plastičnog izvijanja. Raspon kritičnih sila za elastično izvijanje koji je dobiven proračunom, za ulazne podatke prema tablici 3.1 kreće se od maksimalnih 11,75 kN pa niže, što se može vidjeti u dijagramu na slici 3.5.

3.2. Proračun gornje ploče protiv proklizavanja

U ovom proračunu smo pokušali izračunati potrebna naprezanja i potrebne sile kako bi spriječili proklizavanje ploče na kojoj je učvršćen vijak za zatezanje epruvete.

Ulazni podaci:

δ = 2,5 mm (debljina stijenke)

h = 10 mm (visina stijenke)

d = 15 mm (unutarnji promjer čahure)

C_1 = 3 (konstanta za progib grede)

E_{PA} = 1850 MPa (Youngov modul elastičnosti poliamida)

$E_{Č}$ = 210 000 MPa (Youngov modul elastičnosti konstrukcijskog čelika)

$\mu_{PA-Č}$ = 0,07 (koeficijent trenja između poliamida i kons.čelika)

d_v = 5.35 mm (nosivi promjer vijka M6)

F_{tr} = 500 N (maksimalna dopuštena sila protiv proklizavanja)

U proračunu, stezna čahura je promatrana kao dio stijenke posude pod tlakom, a tangencijalno naprezanje σ_t koja se javlja u stijenci se prenosi na stezni vijak kojim se priteže čahura iz poliamida.

$$\sigma_t = \frac{p*d}{\delta*2} \rightarrow \text{p} = \frac{2*\delta}{d} * \sigma_t \rightarrow \text{p} = \frac{2\,F_{vp}}{d*h} \tag{3.1}$$

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_{Č}} \tag{3.2}$$

$F_t = F_{vp}$ – sila u vijku koja vrši deformaciju

$$F_N = \mathrm{p} * \mathrm{A} \rightarrow \mathrm{p} * \mathrm{d} * \mathrm{h} * \pi \tag{3.3}$$

$F_N = 2 * F_{vp} * \pi$

$F_{tr} = \mu * F_N \rightarrow 2 * F_{vp} * \pi$

$$F_{vp} = \frac{2*F_{tr}}{2*\mu*\pi} \tag{3.4}$$

Naprezanje u vijku uslijed deformacije čahure.

Dio naprezanja u vijku da bi se ostvarila sila:

$$\sigma_{VP} = \frac{F_{VD}}{A_v} = \frac{F_{VD}*4}{dv*\pi} = \frac{2*F_{tr}}{\pi^2*\mu*dv^2} \tag{3.5}$$

$$\varepsilon = \frac{\Lambda}{\delta} \rightarrow \frac{\sigma}{E_{PA}} \rightarrow \frac{2*F_{vp}}{d*h*E_{PA}} \tag{3.6}$$

Produljenje vijka

$$\Delta = \frac{F_{tr} * \delta}{d * h * E_{PA} * \pi} \tag{3.7}$$

Opseg neopterećene čahure:

$$\mathrm{O} = (\mathrm{d} + 2\delta) * \pi \tag{3.8}$$

Opseg opterećene čahure:

$$O_{opt.} = (d + 2\delta - 2\,\Delta) * \pi \tag{3.9}$$

Smanjenje opsega:

$$\Delta O = O - O_{opt.} = 2 * \Delta * \pi \rightarrow w \tag{3.10}$$

$$\mathrm{w} = \frac{F_{v\check{c}} * L^3}{C_1 * E_{\check{c}} * I_{\check{c}}} \rightarrow F_{v\check{c}} = \frac{3 * E_{\check{c}} * I_{\check{c}} * w}{L^3} \tag{3.11}$$

$$I_{č} = \frac{b*h^3}{12} = 53{,}3\ mm^4 \tag{3.12}$$

Konačno naprezanje u vijku je zbroj naprezanja poliamid čahure i samog čelika.

$$\sigma_v = \sigma_{VP} + \sigma_{Vč} = \frac{2F_{tr}}{\pi^2 * \mu * dv^2} + \frac{3 * E_{č} * I_{č} * w}{L^3 * dv^2 * \frac{\pi}{4}} \tag{3.13}$$

$$\sigma_v = \frac{2F_{tr}}{\pi^2 * \mu * dv^2} + \frac{12 * E_{č} * I_{č} * 2\pi}{L^3 * dv^2 * \pi} * \frac{F_{tr} * \delta}{d * h * E_{PA} * \pi * \mu} \tag{3.14}$$

$$\sigma_v = \frac{2 * 500}{3{,}14^2 * 0{,}007 * 5{,}35^2} + \frac{12 * 210000 * 53{,}3 * 2}{19^3 * 5{,}35^2} * \frac{500 * 2{,}5}{15 * 10 * 1850 * 3{,}14 * 0{,}07} \tag{3.15}$$

$$\sigma_v = 77{,}9875\ MPa \tag{3.16}$$

Iz proračuna slijedi da se pri naprezanju u vijku od približno 80 MPa osigurava da neće doći do proklizavanja ploče na kojoj je učvršćen vijak za ostvarivanje tlačne sile na epruvetu. Očito je zadovoljen uvjet čvrstoće obzirom da su dozvoljena naprezanja u vijku znatno viša (koristiti će se vijci klase čvrstoće 4.8, što znači da je granica tečenja materijala vijka 320 MPa).

4. Razrada elektroinstalacije i programiranje

Programski kod je izrađen u arduino programskom jeziku. U programu su korišteni moduli za povećanje rezolucije očitanja vrijednosti sile i pomaka.

U kreiranju koda uključene su biblioteke potrebne za pojedine mjerne instrumente. Prije svega to su:

- biblioteka „HX711.h" za HX711 modul za mjerenje sile
- biblioteka „Wire.h“ koja omogućava korištenje I2C protokola (za mjerenje pomaka i zapis podataka na LCD ekran)
- biblioteka „LiquidCrystal_I2C.h“ potrebna za pokretanje LCD zaslona
- biblioteka „Adafruit_ADS1015.h“ potrebna za 16 bitni ADS 1115 modul za povećanje rezolucije očitanja podataka pomoću senzora,
- biblioteka „SD.h“ za spremanje podataka na SD karticu, a pri programiranju definirani su pinovi za spajanje modula na SD karticu.

Modul HX711 ima vrlo važnu ulogu u ovom sklopu. Ovaj modul koristi analogno digitalni pretvarač visoke rezolucije. Ima dva analogna ulazna kanala za mjerne senzore veličina poput tlaka, sile ili pomaka. Ima veliku točnost očitanja podataka. U ovom slučaju spojen je na senzor dinamo vage s 4 tenzometrijske trake. Električni sklop opremljen je i zujalicom koja se aktivira u slučaju prekomjerne sile koja bi mogla oštetiti senzor (mjerno područje senzora za silu je 0 – 2 kN). U programu je bilo potrebno izvršiti korekciju dobivenih vrijednosti sile postupkom kalibracije.

Modul ADS1115 je 16-bitni analogni pretvarač koji značajno povećava rezoluciju očitanja, a time i samu točnost mjerenja. Modul ima četiri ulazna kanala koji se mogu konfigurirati za pojedinačna mjerenja.

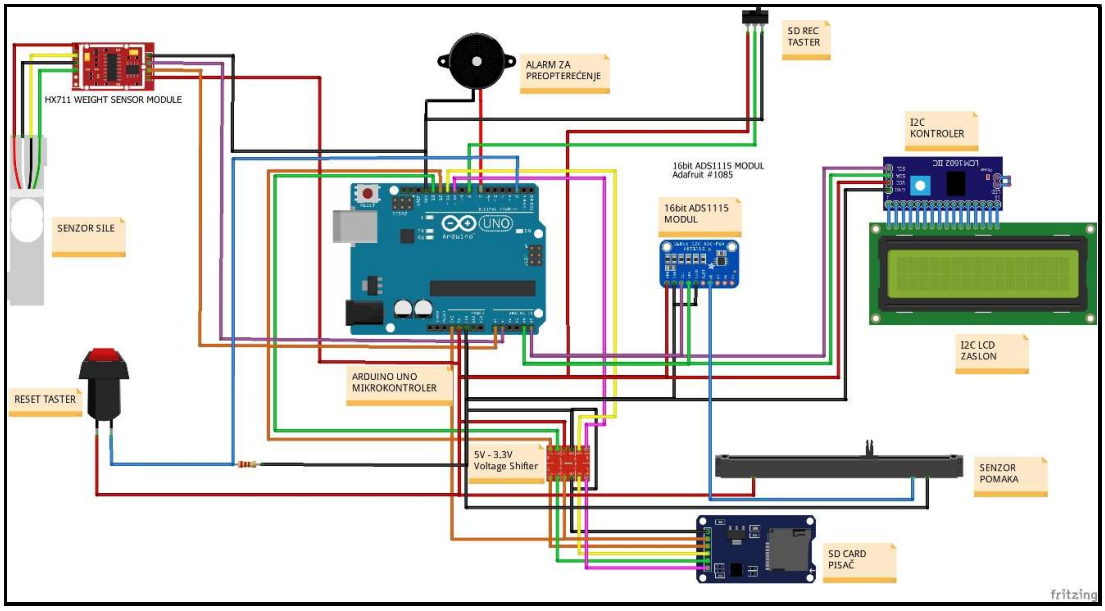
Korišten je mikrokontroler Arudino Uno koji ima 14 digitalnih ulaznih / izlaznih i 6 analognih priključaka, USB priključak, utičnicu za napajanje, gumb za resetiranje.

U postavnom dijelu programa („*setup*“) definirani su potrebni digitalni i analogni priključci prema shemi na slici 4.1. Pokretanje serijskog monitora, kalibracija senzora sile s utegom poznate mase, postavljanje početnih vrijednosti sile te inicijalizacija LCD zaslona i pokretanje 16 bit ADS modula također je odrađen u postavnom dijelu. Postavni dio završava sa zapisom

inicijalnih podataka na SD karticu ukoliko je ista umetnuta, inače se na LCD zaslonu ispiše odgovarajuća poruka: "Kartica neispravna ili se ne nalazi u čitaču!". Postavni dio programa se izvršava samo jednom i to prilikom uključivanja mikrokontrolera.

Drugi dio programa je beskonačna petlja („*loop*“). Ova funkcija se konstantno izvršava čime se omogućava neprekidno mjerenje tlačne sile i bočnog pomaka te ažuriranje podataka na LCD zaslon i zapisivanje istih na SD karticu.

U slučaju prekoračenja sile od 1800 N (varijabla Sila_alarm koja je postavljena na početku koda) pojavljuje se zvučni signal koji upozorava na mogućnost oštećenja senzora za mjerenje sile. U „*loop*“ petlji se nalazi i „reset“ opcija koja postavlja parametre na početne vrijednosti (maksimalnu očitanu silu i veličinu bočnog pomaka vraća na nultu vrijednost).



Slika 4.1 Shematski prikaz programskog koda

Programski kod prikazan je u prilogu 1 ovog rada.

5. Rezultati testiranja

U grafovima na slikama 5.1 do 5.12 su prikazani rezultati ispitivanja. Testiranja su izvršena na sva četiri materijala i to za sve slučajeve osim uklještenja na jednom kraju, a slobodnim drugim krajem epruvete. U grafovima i rezultatima se jasno može vidjeti kolika je potrebna sila za pojedine vrste uklještenja, te pojedina odstupanja veličine kritične sile za elastično izvijanje dobivene pokusom i proračunom po Euleru. Iz svakog od ovih dijagram priloženih u nastavku možemo vidjeti i kako pojedini materijali djeluju na ispitivanja. U priloženim dijagramima može se očitati veličina kritične sile koja se očituje naglim porastom bočnog pomaka epruvete. Kada naprezanje u epruveti dostigne svoj maksimum deformacija epruvete se naglo povećava, a sila postupno počinje opadati. U nastavku su prikazani dijagrami „sila – progib epruvete“ za četiri različita materijala. Valja napomenuti da se uz pomoć dobivenih dijagrama znatno lakše i preciznije može procijeniti veličina kritične sile nego u slučaju praćenja veličine narinute sile tijekom ispitivanja.

5.1. Rezultati ispitivanja epruvete iz konstrukcijskog čelika EN S 235

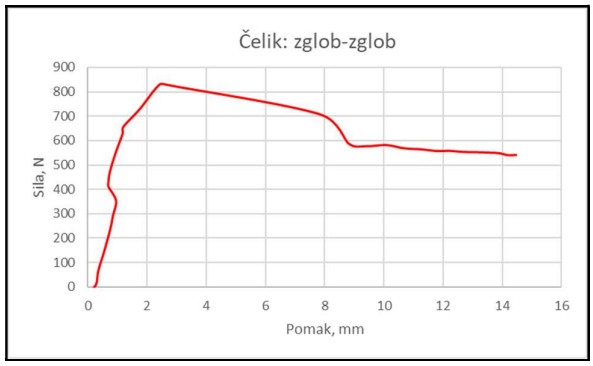
Karakteristike ispitane epruvete: - Granica proporcionalnosti 200 MPa
- Granica tečenja 235 MPa
- Karakteristično naprezanje 320 MPa
- Modul elastičnosti 210 GPa

Dimenzije epruvete: - duljina 500 mm
- širina 20 mm
- debljina 3 mm

5.1.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 830 N

Eulerova sila: 350 N



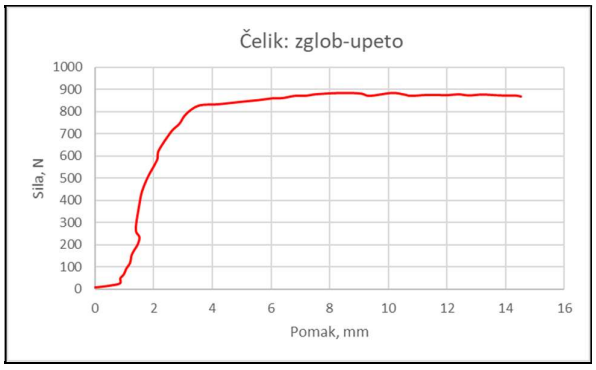
Slika 5.1 Dijagram s rezultatima ispitivanja čelične epruvete zglobno učvršćene na oba kraja

Iz dijagrama na slici 5.1 se mogu vidjeti velika odstupanja proračunskih rezultata s rezultatima dobivenim pokusnom. Razlog tome je što se pojavilo trenje u samom hvatištu epruvete. Uočava se razlika od 480 N što je iznimno veliko odstupanje.

5.1.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 820 N

Eulerova sila: 749 N



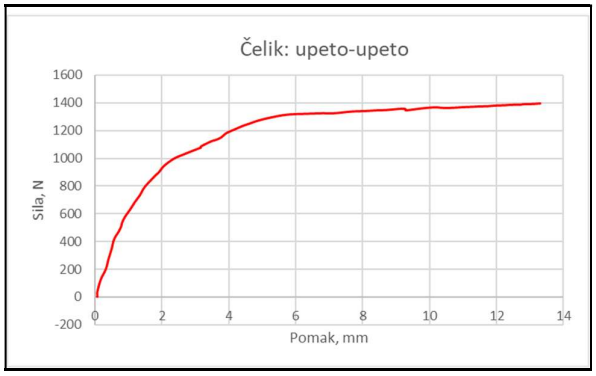
Slika 5.2 Dijagram s rezultatima ispitivanja čelične epruvete zglobno učvršćen na jednom kraju, a na drugom ukliješten

Odstupanje mjerene i proračunske kritične sile iznosi 61 N što je značajno smanjenje greške u odnosu na slučaj „zglob-zglob“ jer se trenje pojavljivalo u samo jednom zglobu pa je i očekivani utjecaj na odstupanje manji (slika 5.2).

5.1.3. Epruveta ukliještena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 1300 N

Eulerova sila: 1480 N



Slika 5.3 Dijagram s rezultatima ispitivanja čelične epruvete ukliještene na oba kraja

U ovom slučaju, kada su oba kraja ukliještena, ne dolazi do velikih odstupanja mjerenih i proračunskih vrijednosti kritične sile. Nešto niže vrijednosti mjerenja su dobivene zbog nesavršenosti geometrije epruvete i uređaja (slika 5.3).

5.2. Rezultati ispitivanja epruvete iz aluminija

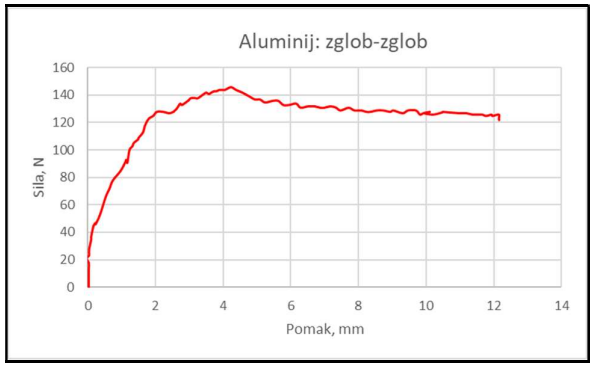
Karakteristike ispitane epruvete: - Granica proporcionalnosti 95 MPa
- Granica tečenja 100 MPa
- Karakteristično naprezanje 110 MPa
- Modul elastičnosti 69 GPa

Dimenzije epruvete: - duljina 500 mm
- širina 20 mm
- debljina 3 mm

5.2.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 130 N

Eulerova sila: 118 N



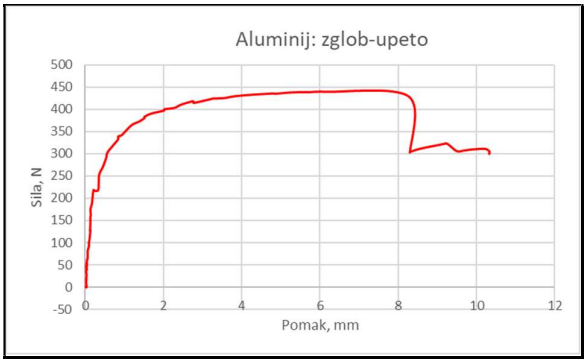
Slika 5.4 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz aluminija zglobno učvršćene na oba kraja

U ovom slučaju odstupanja su iznosila svega 12 N, tako da se mjerena i proračunska kritična sila relativno dobro podudaraju (slika 5.4).

5.2.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 360 N

Eulerova sila: 252 N



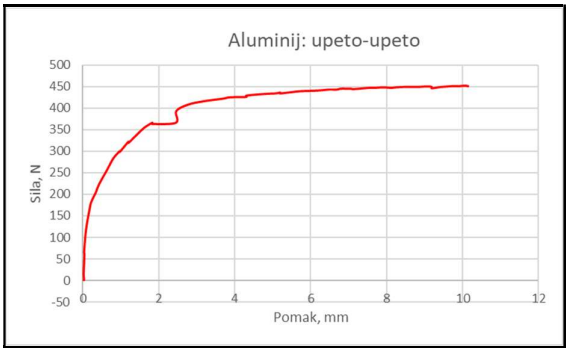
Slika 5.5 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz aluminija zglobno učvršćene na jednom kraju, a ukliještene na drugom

Relativno veliko odstupanje rezultata je djelomično posljedica trenja u hvatištu epruvete (slika 5.5).

5.2.3. Epruveta ukliještena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 400 N

Eulerova sila: 498 N



Slika 5.6 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz aluminija ukliještene na oba kraja

U ovom slučaju mjerenjem su dobivene nešto manje vrijednosti kritične sile zbog geometrijskih odstupanja epruvete i uređaja (slika 5.6).

5.3. Rezultati ispitivanja epruvete iz mjedi

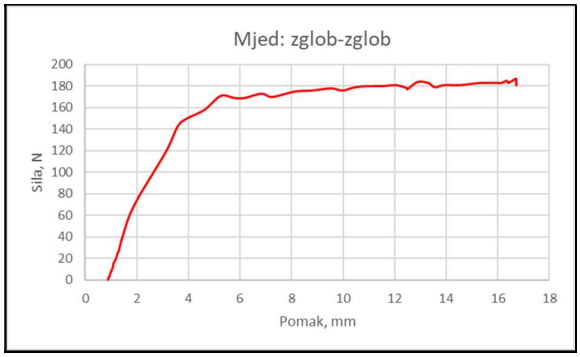
Karakteristike ispitane epruvete: - Granica proporcionalnosti 35 MPa
- Granica tečenja 90 MPa
- Karakteristično naprezanje 124 MPa
- Modul elastičnosti 100 GPa

Dimenzije epruvete: - duljina 500 mm
- širina 20 mm
- debljina 3 mm

5.3.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 173 N

Eulerova sila: 171 N



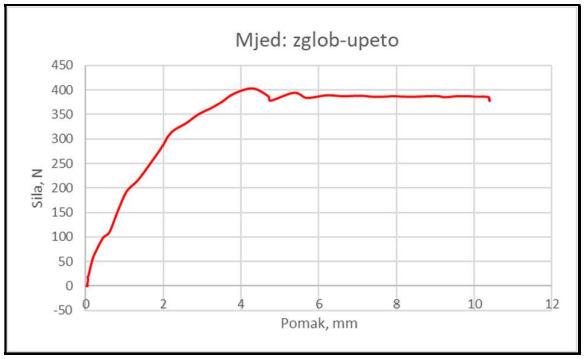
Slika 5.7 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz mjedi zglobno učvršćene na oba kraja

Uočava se dobro poklapanje proračunske i izmjerene vrijednosti kritične sile (slika 5.7).

5.3.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 404 N

Eulerova sila: 365 N



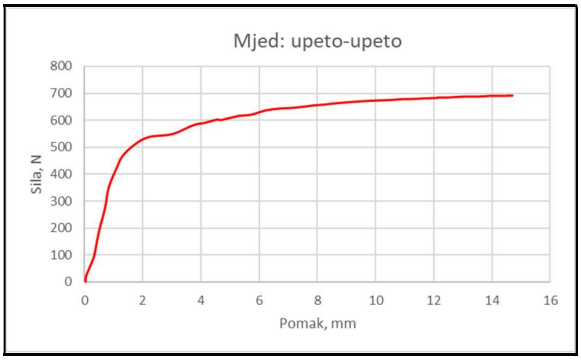
Slika 5.8 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz mjedi zglobno učvršćene na jednom kraju, a na drugom ukliještene

I u ovom slučaju dolazi do manjih odstupanja rezultata. Mjerenjem dobivena vrijednost kritične sile je veća zbog pojave trenja u zglobovima (slika 5.8).

5.3.3. Epruveta ukliještena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 360 N

Eulerova sila: 252 N



Slika 5.9 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz mjedi ukliještene na oba kraja

Kod ovog dijagrama najbolje možemo vidjeti kako bi trebala izgledati krivulja prilikom testiranja na izvijanje. Iako je došlo do odstupanja smatram da je ovo ispitivanje najbliže teoretskom (slika 5.9).

5.4. Rezultati ispitivanja epruveta iz bakra

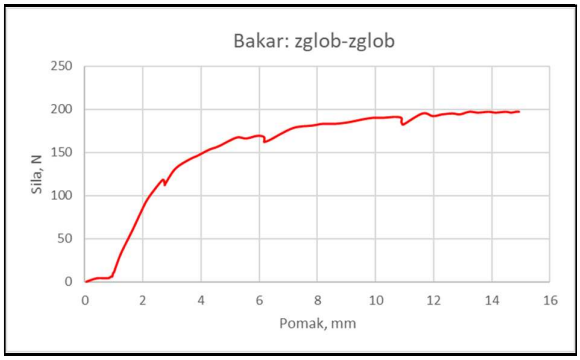
Karakteristike ispitane epruvete: - Granica proporcionalnosti 70 MPa
- Granica tečenja 180 MPa
- Karakteristično naprezanje 220 MPa
- Modul elastičnosti 117 GPa

Dimenzije epruvete: - duljina 500 mm
- širina 20 mm
- debljina 3 mm

5.4.1. Epruveta zglobno učvršćena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 197 N

Eulerova sila: 200 N



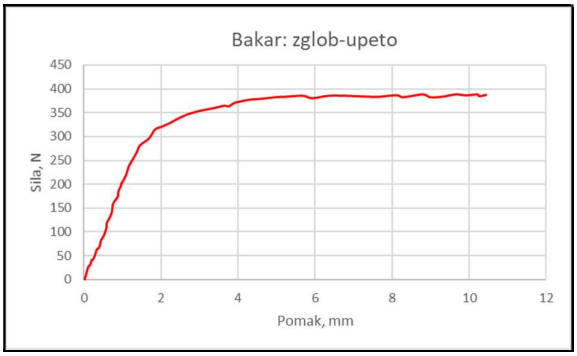
Slika 5.10 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz bakra zglobno učvršćene na oba kraja

Rezultati dobiveni proračunom i mjerenjem se dobro podudaraju (slika 5.10).

5.4.2. Epruveta zglobno učvršćena na jednom kraju, a ukliještena na drugom

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija: 330 N

Eulerova sila: 428 N

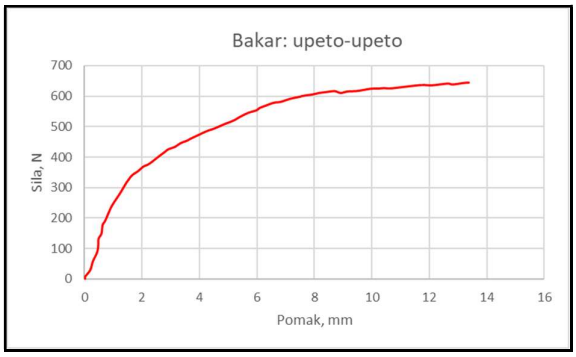


Slika 5.11 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz bakra zglobno učvršćene na jednom, a ukliještene na drugom kraju

Veća odstupanja rezultata najvjerojatnije su posljedica geometrijskih nesavršenosti epruvete i uređaja (slika 5.11).

5.4.3. Epruveta ukliještena na oba kraja

Sila pri kojoj dolazi do većih deformacija:	620	N
Eulerova sila:	845	N



Slika 5.12 Dijagram s rezultatima ispitivanja epruvete iz bakra ukliještene na oba kraja

I u ovom slučaju došlo je do većih odstupanja zbog geometrijskih nesavršenosti epruvete i uređaja (slika 5.12).

Iz dijagrama na slikama od 5.1 do 5.12 s rezultatima pokusa i iz rezultata proračuna je vidljivo da je odstupanje za bakar i mjed relativno malo, dok je za konstrukcijski čelik i aluminij to odstupanje značajnije ovisno o načinu učvršćenja epruvete.

6. Zaključak

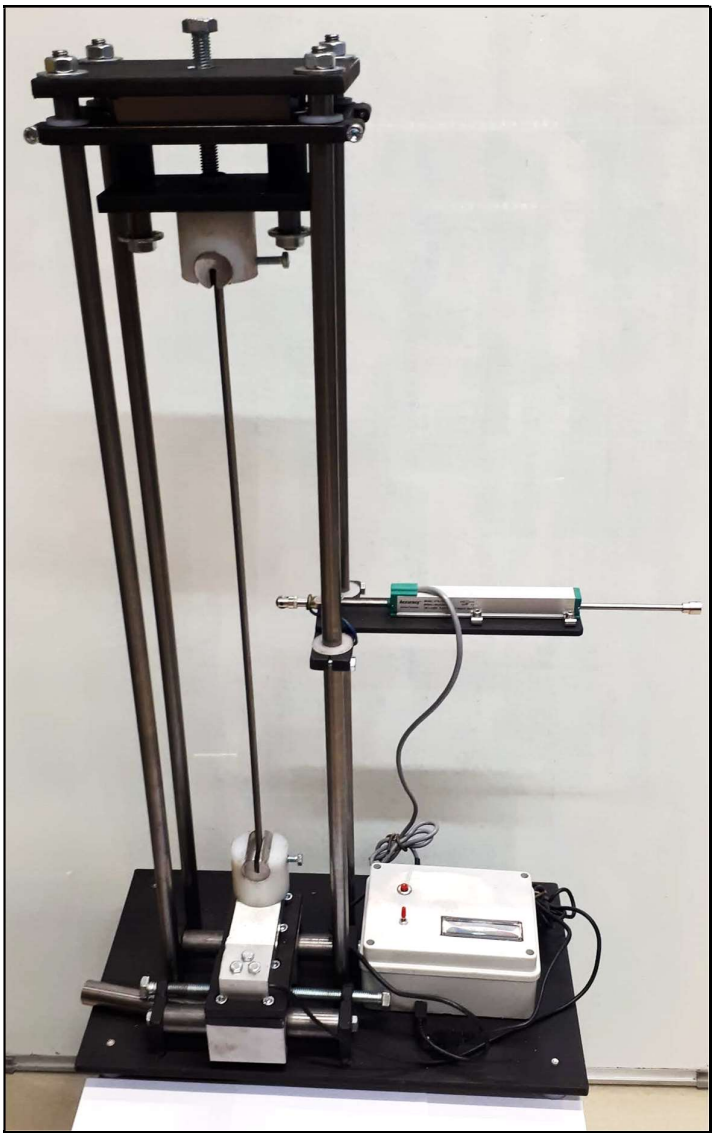
U ovom radu metodičkim pristupom izrađene su dvije varijante uređaja za ispitivanje izvijanja. Prema tehničko ekonomskim kriterijima odabrana je bolja varijanta te je izvršena konstrukcijska razrada i izrada uređaja. Isto tako napravljen je proračun izvijanja epruveta različitih dimenzija kao i načina učvršćenja, a rezultati su prikazani kroz odgovarajuće dijagrame. Sami uređaj u potpunosti je izrađen u strojarskom laboratoriju gdje su se i vršila testiranja (slika 6.1). Testiranja su izvršena na četiri različita materijala (bakar, aluminij, mjed i konstrukcijski čelik). Kod testiranja epruveta valja napomenuti da su se rezultati mjerenja donekle podudarali s rezultatima dobivenim teoretskim izračunima elastičnog izvijanja po Euleru. U slučaju kada je čelična epruveta bila zglobno pričvršćena za oba kraja došlo je do nešto većih odstupanja. Kod testiranja epruveta iz aluminija veća odstupanja dobivena su u slučaju učvršćenja krajeva epruvete „zglob-ukliješteno“. Za slučaj bakra i mjedi nije bilo većih odstupanja u odnosu na teoretske rezultate.

Kod samog praktičnog ispitivanja dobivene su forme izvijanja kako je to prikazano i na slikama 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 za svaki pojedini način učvršćenja epruvete. Sva izvršena mjerenja na uređaju su prikazana i grafički u radu.

Maksimalna sila koja se koristila kod izvijanja nije prelazila 1800 N. Dimenzije epruveta bile usklađene tako da dolazi samo do pojave samo elastičnog izvijanja, a da se ne prelazi vrijednost maksimalno dozvoljene sile. Dimenzije uređaja su takve da smo mogli ispitivati epruvete u rasponu od minimalnih 250 mm do maksimalnih 500 mm duljine. Sve su to gabariti u koje epruvete ulaze u elastično područje s izuzetkom ukliještene epruvete iz čelika (za manje duljine). Isto tako senzor za mjerenje pomaka nam je u milimetar očitavao podatke bočnog izvijanja. Senzor pomaka očitava bočni pomak na proizvoljno podešenoj lokaciji po visini epruvete od -50 mm do 50 mm, što je više nego dovoljno za ispitivanje izvijanja.

Valja napomenuti više razloga zbog kojeg su se pojavljivala odstupanja dobivenih rezultata od rezultata teoretskog proračuna. Prije svega sam uređaj ima određenih dimenzijskih odstupanja. Kod izvijanja epruveta, u slučaju zglobnog učvršćenja, pojavljuje se trenje u samom zglobu pa su stoga rezultati mjerenja bili veći od računskih. Isto tako korištene ispitne epruvete nisu bile geometrijski savršenog oblika (neznatno iskrivljene trake) što je rezultiralo manjim izmjerenim vrijednostima kritične sile za slučaj ukliještenih krajeva u odnosu na proračunske podatke. Sve su to parametri koji su utjecali na završni ishod mjerenja, ali s obzirom da je uređaj edukacijske

naravi smatram da se na njemu može vršiti pokus elastičnog izvijanja. Izrađeni uređaj je prenosiv i vrlo jednostavan za rukovanje.



Slika 6.1 Izrađeni uređaj za ispitivanje izvijanja

7. Literatura

[1] Križan B.: *Osnove proračuna i oblikovanja konstrukcijskih elemenata*, Školska knjiga

[2] Wikipedia: *https: //en.wikipedia.org.buckling*

[3] Mechanics of Materials - Beam Buckling: *https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-beam-buckling/*, Bosoton University – Mechanical Engineering

[4] Alfirević I.: *Nauka o čvrstoći 1*, Tehnička knjiga Zagreb

[5] Kraut B.: *Strojarski priručnik*

[6] Hearn E. J.: *Mechanics of Materials 1 – An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials, 3rd Edition*, Butterworth-Heinemann, 1997.

8. Prilozi

PRILOG 1 – Programski kod za arduino mikrokontroler

PRILOG 2 – Sklopni nacrt

PRILOG 3 – 3D model naprave

PRILOG 4 – Radionički crtež

PRILOG 1 – Programski kod za arduino mikrokontroler

```
#include "HX711.h"                  /* biblioteka potrebna za modul za
                                       mjerenje sile*/
#include <Wire.h>                   /* biblioteka koja omogućava I2C
                                       protokol (mjerenje pomaka i zapis
                                       na LCD zaslon)*/
#include <LiquidCrystal_I2C.h>      /* biblioteka potrebna za pokretanje
                                       LCD zaslona*/
#include <Adafruit_ADS1015.h>       /* biblioteka potrebna za 16bit modul
                                       za mjerenje pomaka*/
#include <SD.h>                     /* biblioteka potrebna za logiranje
                                       podataka na SD karticu*/
#include <SPI.h>                    /* Data Logging - SD card*/

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); /* postavka LCD adrese na 0x27 16
                                     16 znakova i 2 linije zaslona*/
Adafruit_ADS1115 ads(0x48);         /* 16bit ADS modul za mjerenje
                                       pomaka*/
/*  Pinovi za spajanje modula za SD karticu:
    MOSI - pin 11
    MISO - pin 12
    CLK - pin 13
    CS - pin 10
```

```
*/
const int chipSelect = 10;

HX711 scale(A1, A0); // DOUT, SCK Force sensor initialization
//******************   VARIABLE & CONSTANTS SETTING   ******************
float Sila;
float Sila_max=0;
float Pomak;
float Pomak_offset=0;
float Vrijeme=0;
float Staro_vrijeme=0;

int SD_card_pin = 8;
int SD_card_val=0;
int RESET_pin = 2;
int RESET_pin_val=0;
float tara=0;
const int buzzer = 7; //dodjeljivanje digitalnog pina za zujalicu
int Sila_alarm = 1800;
//************   DISPLACEMENT VARIABLE & CONSTANTS SETTING   ************
  float Voltage = 0.0;
  float Displacement_slope = -10.22191;
```

```
  float Displacement_offset = 51.74646;
  //float Displacement;
  //float Force;
  char LCDtext;
  String SD_card_print;
  String LCD_row_0;
  String LCD_row_1;

//**********************   FUNCTION DECLARATION   **********************
void SDcard_Write(String dataString);
float DisplacementMeasuring();
float ForceMeasuring();
void LCD_print(String tekst,int column,int row);
//**********************   FUNCTION DECLARATION   **********************

//*****************************   SETUP   ********************************
void setup()
{
  pinMode(SD_card_pin, INPUT);      /* postavka digitalnog ulaznog pina
                                       za pokretanje snimanja na SD
                                       karticu */
  pinMode(RESET_pin, INPUT);        /* postavka digitalnog ulaznog pina
                                       za resetiranje sustava*/
  pinMode(buzzer, OUTPUT);          /* postavka digitalnog izlaznog pina
                                       za zujalicu */
  Serial.begin(9600);               // pokretanje serijskog monitora
  scale.set_scale(2280.f);          /* vrijednost za kalibraciju senzora
                                       sile s utegom poznate mase */
  scale.tare();                     /* Postavka  početne vrijednosti
                                        sile (F=0) */
  lcd.init();                       // Inicijalizacija lcd zaslona
  // Print a message to the LCD.
  lcd.backlight();
  lcd.print("   Izvijanje");
  ads.begin();                      /* pokretanje 16bit ADS modula
                                       (mjerenje pomaka) */
  delay(1000);
  Pomak_offset = DisplacementMeasuring();

  // Inicijalizacija SD kartice
  Serial.print("Initializing SD card...");

  // Provjera dali se SD kartica nalazi u čitaču:
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
```

```
    Serial.println("Kartica neispravna ili se ne nalazi u čitaču!");
    return;
  }
  Serial.println("SD kartica inicijalizirana...");

  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

    if (dataFile) { /* Ako je datoteka otvorena unosi se novi zapis na
                    SD karticu*/

      dataFile.println("Vrijeme s ;Sila N;Maksimalna sila N;Pomak mm");
      dataFile.close();
    }
}
//*****************************   SETUP END  ******************************

//*******************************    LOOP    ********************************
void loop()
{

  Vrijeme = millis()/1000 - Staro_vrijeme;
  RESET_pin_val = digitalRead(RESET_pin);
```

```
  if (RESET_pin_val > 0){
    Serial.println("*******RESET*******");
    Sila_max = 0;
    Staro_vrijeme = millis()/1000;
    Vrijeme = 0;
    Pomak_offset = DisplacementMeasuring();
    tara = ForceMeasuring();
    Serial.begin(9600);
  }

  Sila = ForceMeasuring()-tara;  // Očitavanje sile
  Pomak = -2.058*(DisplacementMeasuring()- Pomak_offset); /* Očitavanje
                                                            pomaka */
  Serial.print("Pomak:");
  Serial.println(Pomak);
  if (Sila > Sila_alarm){
    tone(buzzer, 500); // Šalji 500kHz zvučni signal na zujalicu ...
    Serial.println("*******ALARM*******");

  }
  else {
    noTone(buzzer);     // Isključi zvuk ...
```

```
  }
  if (Sila > Sila_max){
    Sila_max = Sila;
  }

  SD_card_val = digitalRead(SD_card_pin);
  Serial.println(SD_card_val);
  SD_card_print = String(Vrijeme);
  SD_card_print += " ; ";
  SD_card_print += String(int(Sila));
  SD_card_print += " ; ";
  SD_card_print += String(int(Sila_max));
  SD_card_print += " ; ";
  SD_card_print += String(Pomak);
  Serial.println(SD_card_print);

  if (SD_card_val == 1){
    Serial.println("*******SD CARD*******");
    SDcard_Write(SD_card_print);
    if (int(Sila_max)<10) {
      LCD_row_0 = "F=   " + String(int(Sila_max))+" N"+"     Rec";
    }
    else if (int(Sila_max)<100) {
      LCD_row_0 = "F=  " + String(int(Sila_max))+" N"+"     Rec";
    }
    else if (int(Sila_max)<1000) {
      LCD_row_0 = "F= " + String(int(Sila_max))+" N"+"     Rec";
    }
    else {
      LCD_row_0 = "F=" + String(int(Sila_max))+" N"+"     Rec";
    }
  }
  if (SD_card_val == 0){
    Serial.println("*******NO SD CARD*******");
    if (int(Sila_max)<10) {
      LCD_row_0 = "F=   " + String(int(Sila_max))+" N     "
                  + String(int(Sila))+" N";
    }
    else if (int(Sila_max)<100) {
      LCD_row_0 = "F=  " + String(int(Sila_max))+" N";
      if (int(Sila)<10) {
        LCD_row_0 += "     " + String(int(Sila))+" N";
      }
      else{
```

```
        LCD_row_0 += "    " +String(int(Sila))+" N";
      }
    }
    else if (int(Sila_max)<1000) {
      LCD_row_0 = "F= " + String(int(Sila_max))+" N";
      if (int(Sila)<10) {
        LCD_row_0 += "     " + String(int(Sila))+" N";
      }
      else if (int(Sila)<100) {
        LCD_row_0 += "    " + String(int(Sila))+" N";
      }
      else{
        LCD_row_0 += "   " +String(int(Sila))+" N";
      }
    }
    else {
      LCD_row_0 = "F= " + String(int(Sila_max))+" N";
      if (int(Sila)<10) {
        LCD_row_0 += "    " + String(int(Sila))+" N";
      }
      else if (int(Sila)<100) {
        LCD_row_0 += "   " + String(int(Sila))+" N";

      }
      else if (int(Sila)<1000) {
        LCD_row_0 += "  " + String(int(Sila))+" N";
      }
      else{
        LCD_row_0 += " " +String(int(Sila))+" N";
      }
    }
  }
  if (int(Pomak)<10) {
    LCD_row_1 = "d=  " + String(Pomak)+" mm     ";
  }
  else {
    LCD_row_1 = "d= " + String(Pomak)+" mm     ";
  }

  LCD_print(LCD_row_0,0,0);
  LCD_print(LCD_row_1,0,1);
}
//*************************    LOOP END   ****************************

//******************************
```

```
//***    Force Measuring     ***
//*******************************
float ForceMeasuring()
{
  delay(10);
  scale.power_up();
  float Force = scale.get_units()*9.81/17.3;
  scale.power_down(); // isključivanje senzora sile
  return Force;
}
//***********************    Force Measuring END   ************************

//*******************************
//*** Displacement Measuring ***
//*******************************
float DisplacementMeasuring()
{
    int16_t adc0;  // čitanje pomaka s ADC - 16bit cjelobrojna vrijednost
    adc0 = ads.readADC_SingleEnded(0);
    Voltage = (adc0 * 0.1875)/1000;
    // Preračunavanje pomaka na temelju kalibracije
    float Displacement = Displacement_offset
                         + Displacement_slope * Voltage;

    return Displacement;
}
//*********************    Displacement Measuring END  *********************

//*******************************
//******* SD CARD write ********
//*******************************
void SDcard_Write(String dataString){
    // Otvaranje datoteke za pohranu podataka
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

    if (dataFile) {  /* Ako je datoteka otvorena unosi se novi zapis
                        na SD karticu*/
      dataFile.println(dataString);
      dataFile.close();
    }
    else {  /* Ako datoteka nije otvorena na serijski monitor se
               ispisuje greška */
      Serial.println("Error opening file: izvijanje_datalog.txt");
    }
```

```
}
//**********************    SD CARD write END  ***************************

//*******************************
//********** LCD print **********
//*******************************
void LCD_print(String tekst,int column,int row)
{
//lcd.clear();
  lcd.setCursor(column,row);
  lcd.print(tekst);
}
//*************************    LCD print END  ***************************
```

Prilog 2 – sklopni nacrt

Prilog 3 – 3D model naprave

Prilog 4 – Radionički crteži