

Određivanje mehaničkih karakteristika 3D printanih modela

Milosavljević, Lea

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:137596>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Lea Milosavljević

Određivanje mehaničkih karakteristika 3D printanih modela

Završni rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni preddiplomski studij
Mehanika I**

**Lea Milosavljević
JMBAG: 0114032603**

Određivanje mehaničkih karakteristika 3D printanih modela

Završni rad

Rijeka, 09.2022.

Rijeka, 14. rujna 2022.

Zavod: **Zavod za nosive konstrukcije i tehničku mehaniku**
Predmet: **Mehanika I**
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

ZAVRŠNI ZADATAK br.

Pristupnik: **Lea Milosavljević (0114032603)**
Studij: **Građevinarstvo**

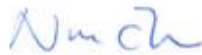
Zadatak: **Određivanje mehaničkih karakteristika 3D printanih modela**

Opis zadatka:

Pročitati literaturu vezanu za čisto savijanje grednih nosača. Isplanirati eksperiment savijanja u 4 točke s grednim nosačem sastavljenim od dva različita sloja, odabrati materijal za 3D printanje i dizajnirati 3D model u odabranom softver. Pripremiti uzorak za ispitivanje i mjernu opremu za optičko mjerenje pomaka i deformacija. Provesti eksperimente na 3 uzorka i obraditi rezultate mjerenja. Komentirati rezultate, donijeti zaključke i predložiti nastavak ispitivanja.

Zadatak uručen pristupniku: 4. travnja 2022.
Rok za predaju rada: 19. rujna 2022.

Mentor:



Doc. dr. sc. Nina Čeh



Doc. dr. sc. Teo Mudrić (komentor)

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Lea Milosavljević

U Rijeci, 19.09.2022.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici Nini Čeh i komentoru Teu Mudriću na razumijevanju i usmjeravanju tijekom pisanja i izrade završnog rada, kao i pomoći tijekom studiranja.

SAŽETAK

U radu je prikazana provedba eksperimentalne analize savijanja u četiri točke na uzorcima različitih dimenzija sastavljenim od slojeva različite krutosti koji su dobiveni 3D printanjem. U radu su dane i osnovne pretpostavke koje se tiču čistog savijanja, savijanja poprečnim silama, Timošenkova teorija grede, proračun progiba zadanog homogenog nosača te uvod u Aramis optički mjerni sustav i obradu podataka u GOM Correlate programu koji su korišteni za mjerenje pomaka. Na kraju su prikazani rezultati optičkih mjerenja te primjereni zaključci u kojima se može vidjeti da je greda većeg poprečnog presjeka doživjela lom pri većoj sili od grede manjeg poprečnog presjeka.

Ključne riječi: 3D printanje, čisto savijanje, analiza savijanja u 4 točke, optičko mjerenje pomaka

SUMMARY

The main purpose of this thesis is to conduct an experimental analysis of four-point bending on samples of with layers with different stiffness obtained by 3D printing. Assumptions in from pure bending and shear bending, as well as the Timoshenko beam theory, are presented. Furthermore, the paper contains an introduction to the application of the Aramis optical measurement system and a description of data processing using the GOM Correlate system, which were used to measure the displacement. In the final part of the paper, results of optical measurements along with conclusions are given in which it can be seen that a beam with larger cross-section experienced fracture at a higher force than a beam with a smaller cross-section.

Key words: 3D printing, pure bending, four–point bending, optical displacement measurement

POPIS SLIKA

Slika 1: Čisto savijanje. [1]	13
Slika 2: Čisto savijanje – elastična linija je kružnica. [4]	14
Slika 3: Savijanje grede – hipoteza ravnih poprečnih presjeka. [1]	15
Slika 4: Deformacija vlakana u gredi. [1]	15
Slika 5: Skica sila i deformacija kod čistog savijanja. [1]	16
Slika 6: Linearna raspodjela naprezanja i deformacija po visini poprečnog presjeka. [1]	17
Slika 7: Savijanje poprečnim silama. [1]	18
Slika 8: Vitoperenje. [2]	19
Slika 9: Prikaz deformiranog oblika grede kod Timošenkove teorije savijanja. [5]	20
Slika 10: Prikaz deformacije grednog elementa uslijed djelovanja čistog posmika. [5]	21
Slika 11: Definicija pozitivne i negativne kutne deformacije u koordinatnom sustavu x-z. [5]	23
Slika 12: Shema opterećenja.	24
Slika 13: Dijagrami poprečnih sila i momentni dijagram.	24
Slika 14: Područje čistog savijanja za zadanu gredu.	25
Slika 15: Savijanje nosača.	25
Slika 16: Progib i kut zaokreta zadanog nosača.....	26
Slika 17: Podjela zadanog nosača u 3 segmenta.....	27
Slika 18: Model 1 u Autodesk Fusionu 360.	30
Slika 19: Original Prusa i3.	30
Slika 20: Model 1 isprintan na Original Prusa i3 3D printeru.	31
Slika 21: Model 2 u programu Inventor, dimenzije u mm.	31
Slika 22: Model 3 u programu Inventor, dimenzije u mm.	32
Slika 23: Aramis sustav 3D kamera.	33
Slika 24: Pripremljeni uzorak za ispitivanje.	34

Slika 25: Kidalica Zwick/Roell Z600 u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci.....	35
Slika 26: Označavanje uzorka.....	37
Slika 27: Prikaz ugrađenog uzorka za ispitivanje.	37
Slika 28: Shema opterećenja u cm.....	38
Slika 29: Dijagram sila – pomak za udaljenost sila 2,7 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.	39
Slika 30: Shema opterećenja u cm.....	40
Slika 31: Dijagram sila – pomak za udaljenost sila 3,5 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.	40
Slika 32: Shema opterećenja u cm.....	41
Slika 33: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,25 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.	42
Slika 34: Dijagram vertikalnog pomaka uzorka 1 poprečnog presjeka 4x4cm s razmakom sila 4,25 cm od ruba.	43
Slika 35: Pripremljeni uzorak za ispitivanje 2.	44
Slika 36: Prikaz ugrađenog uzorka za ispitivanje.	44
Slika 37: Shema opterećenja u cm.....	45
Slika 38: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,8 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 3x3 cm.	45
Slika 39: Dijagram početka vertikalnog pomaka točaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.	46
Slika 40: Dijagram vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.	47
Slika 41: Shema opterećenja u cm.....	47
Slika 42: Dijagram sila – pomak za raspon sila 6.4 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 3x3 cm.	48
Slika 43: Deformirani uzorak u kidalici.	48
Slika 44: Slomljeni uzorak nakon ispitivanja.....	49

Slika 45: Dijagram početka vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 6,4 cm od ruba.	49
Slika 46: Dijagram vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 6,4 cm od ruba.	50
Slika 47: Pripremljeni uzorak za ispitivanje.	51
Slika 48: Prikaz uzorka u kidalici.	51
Slika 49: Shema opterećenja u cm.	52
Slika 50: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,8 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm.	52
Slika 51: Slomljeni uzorak nakon ispitivanja.	53
Slika 52: Dijagram početka vertikalnog pomaka uzorka 3 poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.	53
Slika 53: Dijagram vertikalnog pomaka uzorka 3 poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.	54

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	6
SUMMARY	7
POPIS SLIKA	8
1. UVOD.....	12
2. SAVIJANJE GREDNIH NOSAČA.....	13
2.1. Čisto savijanje – Beronullieva hipoteza.....	13
2.2. Savijanje poprečnim silama	18
2.3. Timošenkova teorija savijanja grede	20
3. PRORAČUN ZADANOG NOSAČA.....	24
4. TRODIMENZIONALNI ZAPIS	29
4.1. Modeliranje i ispis uzoraka za ispitivanje	29
5. KORIŠTENA OPREMA	33
5.1. Aramis optički mjerni sustav.....	33
5.2. Priprema uzorka i optičkog mjernog sustava.....	34
5.3. Kidalica za ispitivanje	35
6. OPIS ISPITIVANJA I REZULTATI.....	36
6.1. Pregled ispitivanja i rezultati.....	36
6.1.1. Ispitivanje 1	37
6.1.2. Ispitivanje 2	43
6.1.3. Ispitivanje 3	51
7. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA.....	56

1. UVOD

U ovom radu provedena su ispitivanja analize savijanja u četiri točke s ciljem dobivanja eksperimentalnih rezultata koji mogu služiti za validaciju predikcije pojave pukotina u numeričkim modelima. Ispitivanja su provedena na tri uzorka različitih dimenzija sastavljenim od slojeva različite krutosti koji su prije samog ispitivanja dizajnirani u 3D CAD programima i printani 3D printerom. Cilj ovih ispitivanja je slomiti uzorke, gdje se smanjenjem međusobnog razmaka između sila povećava unutarnji moment u zoni čistog savijanja, što također utječe na povećanje vlačnih naprezanja. Na taj način se približavamo vlačnoj čvrstoći materijala.

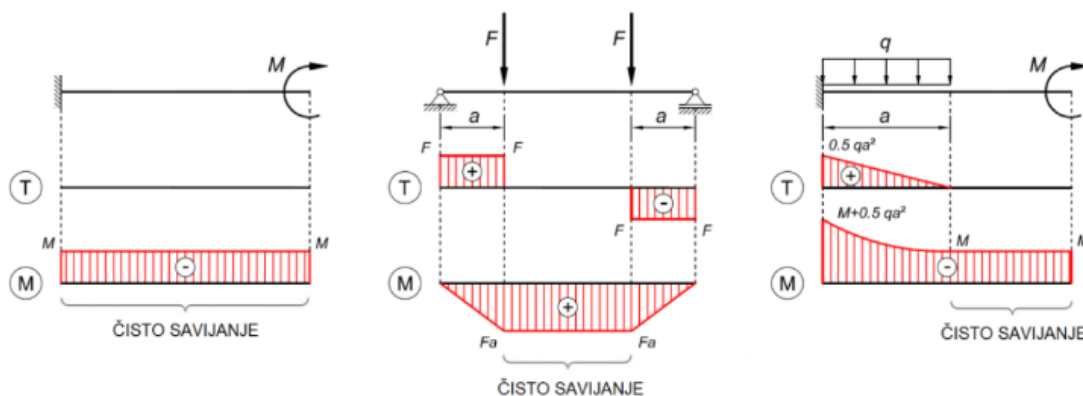
Uzorci su napravljeni printanjem na 3D printeru. 3D ispis ili trodimenzionalni ispis je način brze izrade prototipa pomoću uređaja koji rade na temelju 3D tehnologije te direktno iz 3D programa izrađuju fizičke predmete. Danas trodimenzionalan ispis daje inženjerima mogućnost jasnog uvida u tijek postupka dizajniranja te mogućnost uočavanja mogućih grešaka i ispravljanja istih. Pokus je snimljen optičkim sustavom od dvije kamere, te su rezultati obrađeni u GOM Correlate programu. Svi rezultati su potkrijepljeni grafičkim prikazima. Provedenim pokusima dobit ćemo područja čistog savijanja ovisno o položaju sila u odnosu na rub nosača.

2. SAVIJANJE GREDNIH NOSAČA

2.1. Čisto savijanje – Beronullieva hipoteza

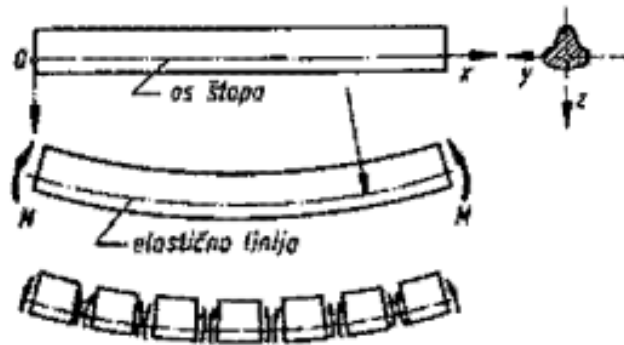
Gredni nosači tj. grede djeluju prvenstveno otporom na poprečno savijanje. Uslijed djelovanja koncentriranih poprečnih sila ili kontinuiranog poprečnog opterećenja deformiraju se na način kojeg nazivamo savijanjem. Kod savijanja se događa savijanje uzdužne osi nosača. [1]

Kod grednih nosača savijanje uzrokuju momenti savijanja te razlikujemo slučajeve prikazane na Slici 1. Prva vrsta savijanja je čisto savijanje duž cijelog nosača koje je izazvano momentima savijanja i javlja se na mjestima gdje je momentni dijagram konstantan, a dijagram poprečnih sila je jednak nuli. Savijanje poprečnim silama je izazvano poprečnim kontinuiranim opterećenjem ili poprečnim koncentriranim opterećenjem. Savijanje poprečnim silama javlja se na dijelovima gdje momentni dijagram nije konstantan i gdje je dijagram poprečnih sila različit od 0, što je primjerice vidljivo na bočnim dijelovima srednjeg nosača na Slici 1. [1]



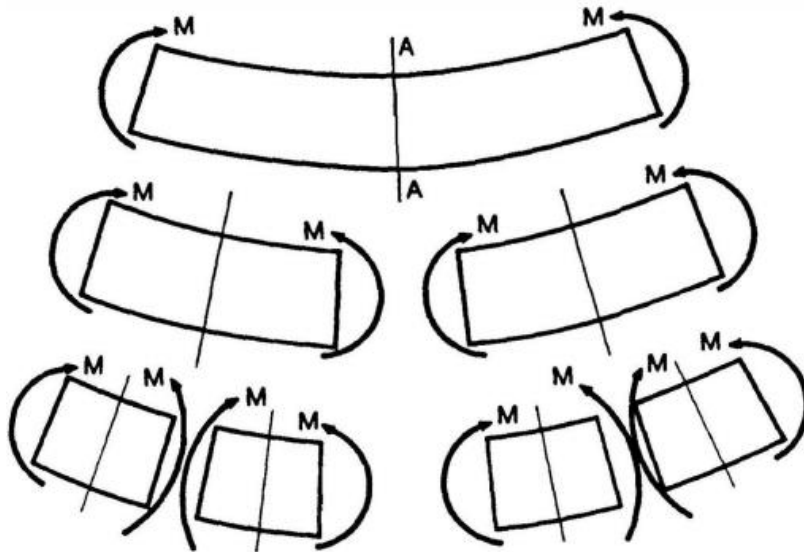
Slika 1: Čisto savijanje. [1]

Pod djelovanjem samo momenta savijanja (u situaciji gdje je dijagram poprečnih sila jednak nuli) greda se savija. Moment savijanja je u svim poprečnim presjecima štapa jednak, što znači da su svi djelovi štapa u jednakim uvjetima. Iz toga možemo zaključiti da će i zakrivljenost svih dijelova grede biti jednaka. Uzdužna os štapa će preći u krivulju koja ima konstantnu zakrivljenost, a to je kružni luk, što znači da se greda savija po kružnome luku (Slika 2). [2]



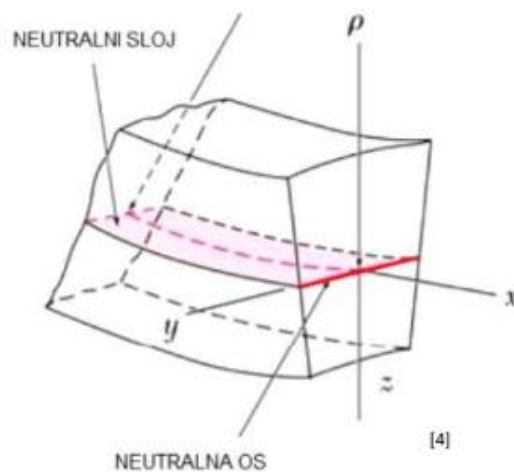
Slika 2: Čisto savijanje – elastična linija je kružnica. [4]

Ako pri čistom savijanju pretpostavimo da krajnji presjeci štapa ostaju ravni, može se lako pokazati da pri deformaciji štapa svi poprečni presjeci ostaju ravni i okomiti na savijanu os grede. Na Slici 3 u sredini grede u poprečnom presjeku A-A, zbog uvjeta simetrije točke presjeka ne mogu dobiti pomak ni desno ni lijevo. Srednji presjek će zbog toga ostati vertikalni i okomit na os grede. Također će se po tom principu dokazati da srednji presjek ostaje okomit i vertikalni na os grede u četvrtini dužine, osmini dužine, itd. Točnije, svaki presjek štapa ostaje okomit i ravan na os štapa. Dolazimo do zaključka da će ravni poprečni presjeci pri deformaciji grede ostati okomiti i ravni na savijenu os grede, dakle pri čistom savijanju štapa vrijedi Bernoullieva hipoteza (hipoteza ravnih poprečnih presjeka). [2]



Slika 3: Savijanje grede – hipoteza ravnih poprečnih presjeka. [1]

Vlakna koja su uzdužna se produljuju na strani nosača koja je konveksna (Slika 3 donja strana), a na strani koja je konkavna se pojavljuje skraćenje (Slika 3 gornja strana). Iz toga je očigledno da postoji sloj čija vlakna zadržavaju početnu duljinu i čija se vlakna savijaju. Točnije, ta vlakna se ne produljuju niti skraćuju. Sloj koji sadrži nedeformirana vlakna se naziva neutralni sloj, a sjecište poprečnog presjeka s neutralnim slojem se zove neutralna os (Slika 4). [2]

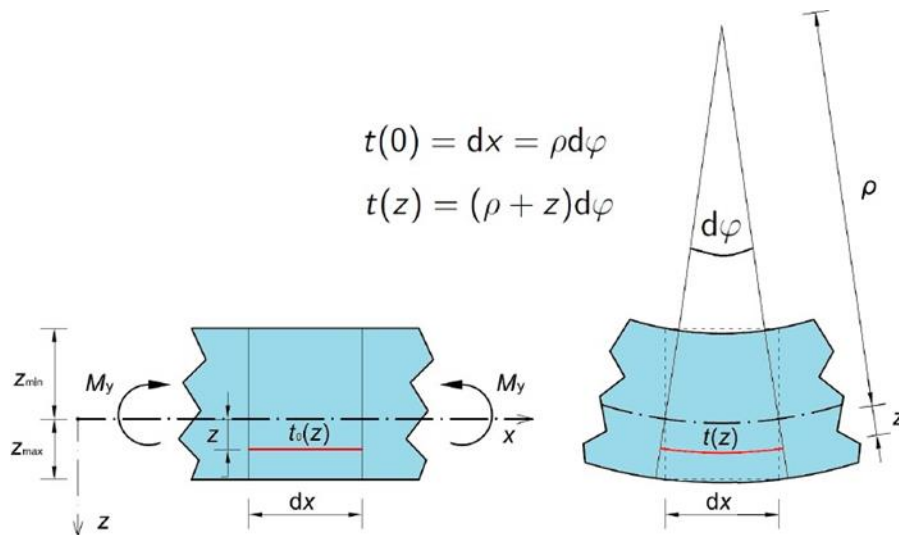


Slika 4: Deformacija vlakana u gredi. [1]

Deformacije kod savijanja na Slici 5 promotrimo na diferencijalnom dijelu duljine dx . Na Slici 5 se s lijeve strane nalazi nedeformirano stanje, dok se na desnoj strani nalazi deformirano stanje grede kod čistog savijanja. $t_0(z)$ označimo kao duljinu vlakna prije nastale deformacije na udaljenosti z od neutralnog sloja, a $t(z)$ označimo kao duljinu vlakna nakon deformacije na udaljenosti z od neutralnog sloja, u gredi ćemo deformaciju vlakana zapisati kao:

$$\varepsilon(z) = \frac{\Delta t(z)}{t_0(z)} = \frac{t(z) - t_0(z)}{t_0(z)} = \frac{(\rho + z)d\varphi - dx}{dx} = \frac{(\rho + z)d\varphi - \rho d\varphi}{\rho d\varphi} = \frac{z}{\rho}, \quad (1)$$

gdje je ρ radijus zakrivljenosti. [3]

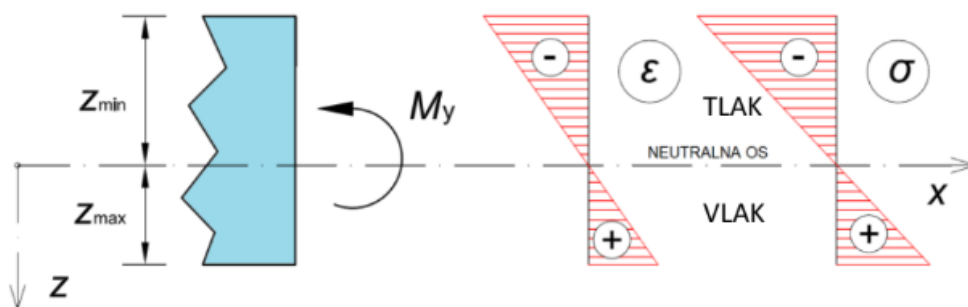


Slika 5: Skica sila i deformacija kod čistog savijanja. [1]

Kako je deformacija vlakna grede proporcionalna njegovoj udaljenosti od neutralne osi, iz Hookeovog zakona slijedi da je raspodjela naprezanja po visini poprečnog presjeka linearna:

$$\sigma(z) = E\varepsilon(z) = \frac{E}{\rho} \quad (2)$$

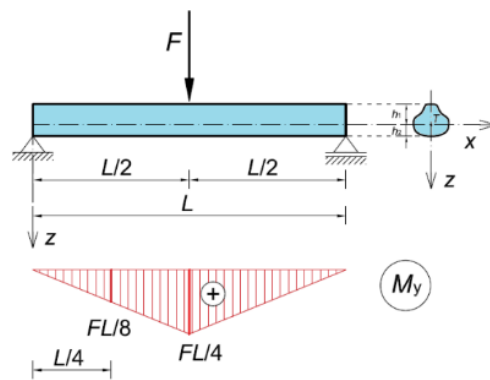
U presjeku se javljaju vlačna i tlačna naprezanja (Slika 6). [1]



Slika 6: Linearna raspodjela naprezanja i deformacija po visini poprečnog presjeka. [1]

2.2. Savijanje poprečnim silama

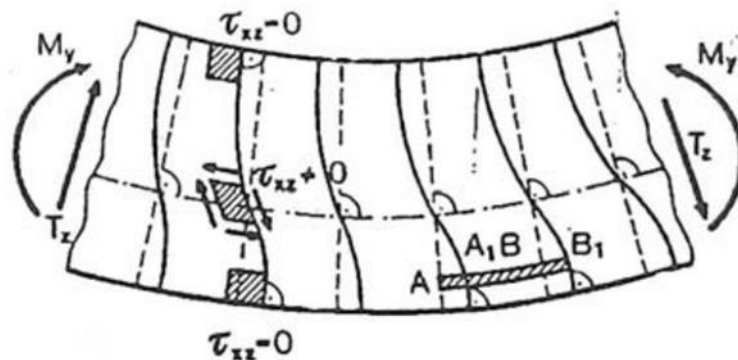
Promatramo gredu konstantnog poprečnog presjeka koja sadrži jednu os simetrije. Greda je opterećena silama koje djeluju okomito na os i leže u ravnini koja prolazi kroz os simetrije grede i kroz os simetrije poprečnog presjeka. Savijanje grede će se dogoditi u ravnini u kojoj leži os grede i os simetrije (glavna ravnina savijanja grede), gdje će se ravnina savijanja grede poklapati s ravninom opterećenja. [2]



Slika 7: Savijanje poprečnim silama. [1]

Budući da u proizvoljnome presjeku grede imamo djelovanje poprečne sile T_z uz moment savijanja, u presjeku se pojavljuju i posmična naprezanja τ_{xy} i τ_{xz} uz normalna naprezanja σ_x . U točkama donjeg i gornjeg ruba poprečnog presjeka posmično naprezanje je $\tau_{xz} = 0$ te prema zakonu o uzajamnosti posmičnih naprezanja je $r_{xz} = 0$ zbog toga što nema djelovanja opterećenja u smjeru osi grede. Iz toga proizlazi da su posmične deformacije jednake $\gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} = 0$. Po visini poprečnog presjeka je raspodjela raspodjela posmičnih naprezanja τ_{xz} , a time i posmičnih deformacija $\gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz}$ je nejednolika. Iz toga zaključujemo da dolazi do vitoperenja poprečnih presjeka pri savijanju poprečnih sila. [2]

Zaokretanje poprečnih presjeka zbog čistog savijanja je prikazano na Slici 8 iscrtkanim linijama, dok je iskrivljenje poprečnih presjeka zbog posmičnih naprezanja prikazano punim linijama. Iskrivljenje svih poprečnih presjeka će biti jednako na dijelu grede na kojemu je poprečna sila konstantna. Pomak AA_1 je jednak pomaku BB_1 , točnije $\overline{AA_1} = \overline{BB_1}$, tako da produljenje vlakna AB , a time i deformacija ε_{xy} , odnosno naprezanja σ_x ne ovisi o tome ostaju li poprečni presjeci ravni ili ne. Zbog toga će izraz za naprezanje i deformaciju dobiveni za čisto savijanje u postpunosti vrijediti i u ovom slučaju savijanja silama. [2]

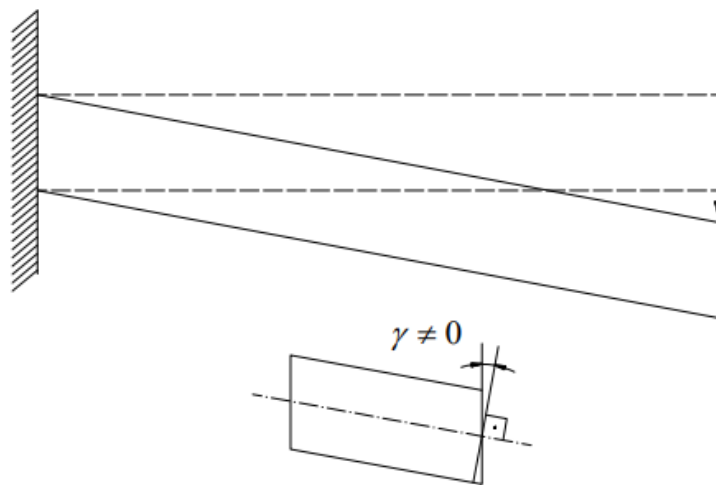


Slika 8: Vitoperenje. [2]

2.3. Timošenkova teorija savijanja grede

Timošenkova teorija savijanja grede opisuje problem savijanja grede u kojem je uključeno djelovanje posmika prilikom savijanja. Teorija je nastala kao proširenje na Bernoullijevu teoriju savijanja greda kojima je omjer između karakteristične dimenzije poprečnog presjeka i duljine grede h/l veći, tj. gdje je duljina grede neznatno veća od dimenzija njezinog poprečnog presjeka, pri čemu se utjecaj posmika na iskrivljenje poprečnog presjeka više nije mogao zanemariti.

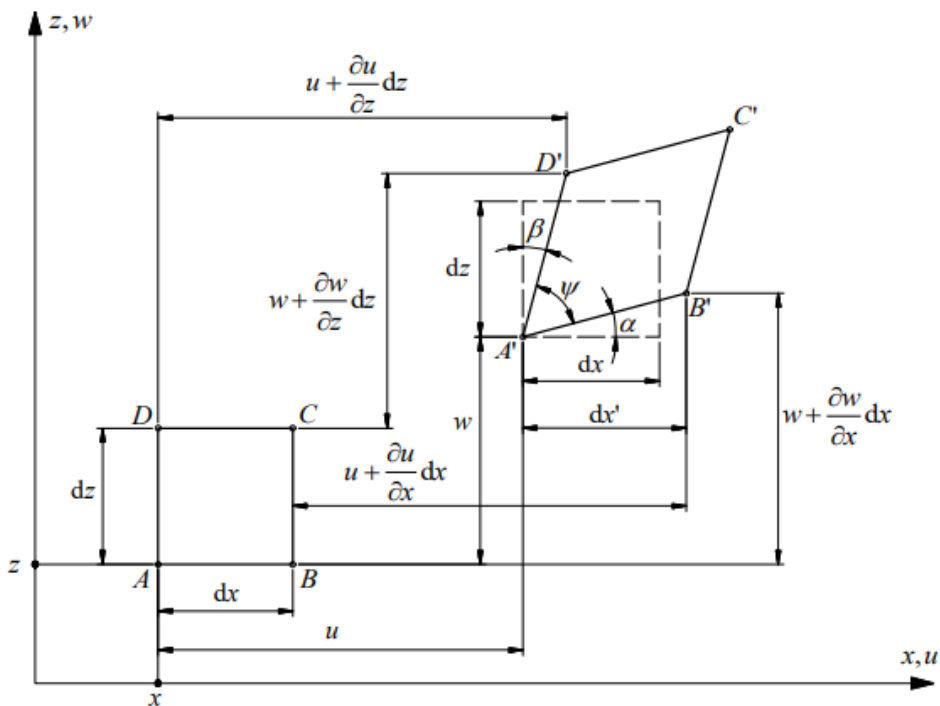
Kod Timošenkove teorije savijanja greda dolazi do rotiranja poprečnih presjeka oko točaka na neutralnoj liniji, gdje poprečni presjeci ostaju ravni. Nakon deformiranja oni više nisu okomiti na elastičnu liniju zbog kutne deformacije koja nastaje uslijed posmika pri poprečnom savijanju. Pod djelovanjem posmika dolazi do iskrivljenja poprečnog presjeka te se poprečni presjek dodatno zaokreće za neki kut u odnosu na pravi kut (Slika 9). [5]



Slika 9: Prikaz deformiranog oblika grede kod Timošenkove teorije savijanja.

[5]

Taj kut određuje kutnu deformaciju uslijed djelovanja posmika. Naprezanja koja se prema Timošenkovoj teoriji pojavljuju su σ_x , normalno naprezanje i τ_{xz} , posmično naprezanje. Sve ostale komponente su jednake nuli. Kako bismo mogli definirati Timošenkovu diferencijalnu jednadžbu elastične linije, trebamo pronaći vezu između pomaka i deformacija, točnije definirati kutne deformacije. Na Slici 10 ćemo razmatrati mali pravokutni element ABCD u ravnini xz koji se deformira pod djelovanjem čistog posmičnog naprezanja. [5]



Slika 10: Prikaz deformacije grednog elementa uslijed djelovanja čistog posmika. [5]

Zbog deformacije dolazi do promjene duljina stranica elementa te do promjena pravih kuteva elementa. Pomak u označava pomak u smjeru osi x, dok pomak označen slovom w označava pomak u smjeru osi z. Kako bi se približe opisale deformacije točaka B i D treba se razviti Taylorov red oko točke A. [5]

Deformacija točke A se može opisati pomoću funkcija pomaka $u(x,z)$ i $w(x,z)$. Iz toga za točku B imamo:

$$u_B = u(x + dx, z) = u(x, z) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial z} dz, \quad (3)$$

$$w_B = w(x + dx, z) = w(x, z) + \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial z} dz, \quad (4)$$

dok za točku D imamo:

$$u_D = u(x + dx, z) = u(x, z) + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial z} dz, \quad (5)$$

$$w_D = w(x + dx, z) = w(x, z) + \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial z} dz. \quad (6)$$

Ako uzmemo u obzir da za točku B vrijedi $\frac{\partial}{\partial z} = 0$, a za točku D vrijedi

$\frac{\partial}{\partial x} = 0$, dobijemo:

$$u_B = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad (7)$$

$$w_B = w + \frac{\partial w}{\partial x} dx, \quad (8)$$

$$u_D = u + \frac{\partial u}{\partial z} dz, \quad (9)$$

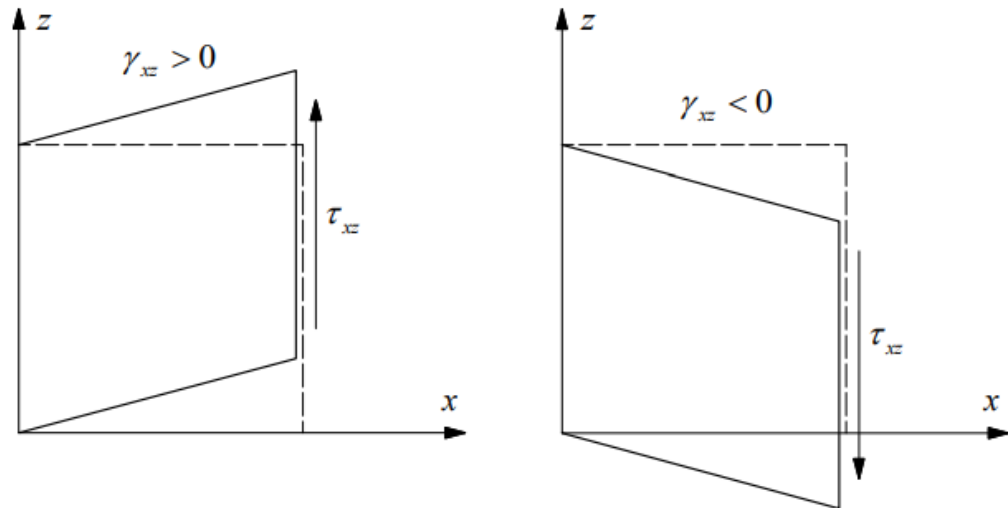
$$w_D = w + \frac{\partial w}{\partial z} dz. \quad (10)$$

Uz pomoć Slike 10, tangense kuteva izrazit ćemo iz trokuta deformacija iz čega slijedi:

$$\gamma_{xz} = \frac{w + \frac{\partial w}{\partial x} dx - w}{dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx} + \frac{u + \frac{\partial u}{\partial z} dz - u}{dz + \frac{\partial u}{\partial z} dz}, \quad (11)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\frac{\partial w}{\partial x} dx}{dx \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)} + \frac{\frac{\partial u}{\partial z} dz}{dz \left(1 + \frac{\partial u}{\partial z}\right)}. \quad (12)$$

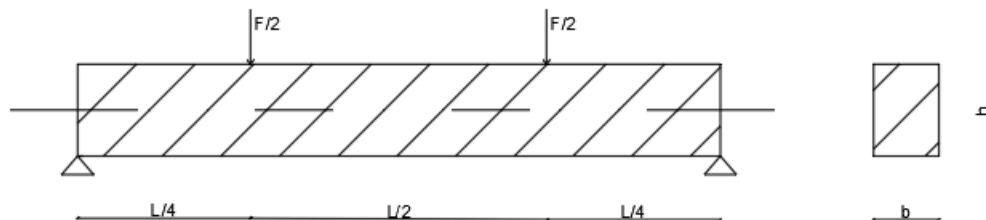
Bitno je definirati pozitivnu i negativnu vrijednost kutne deformacije koja je prikazana na Slici 11. [5]



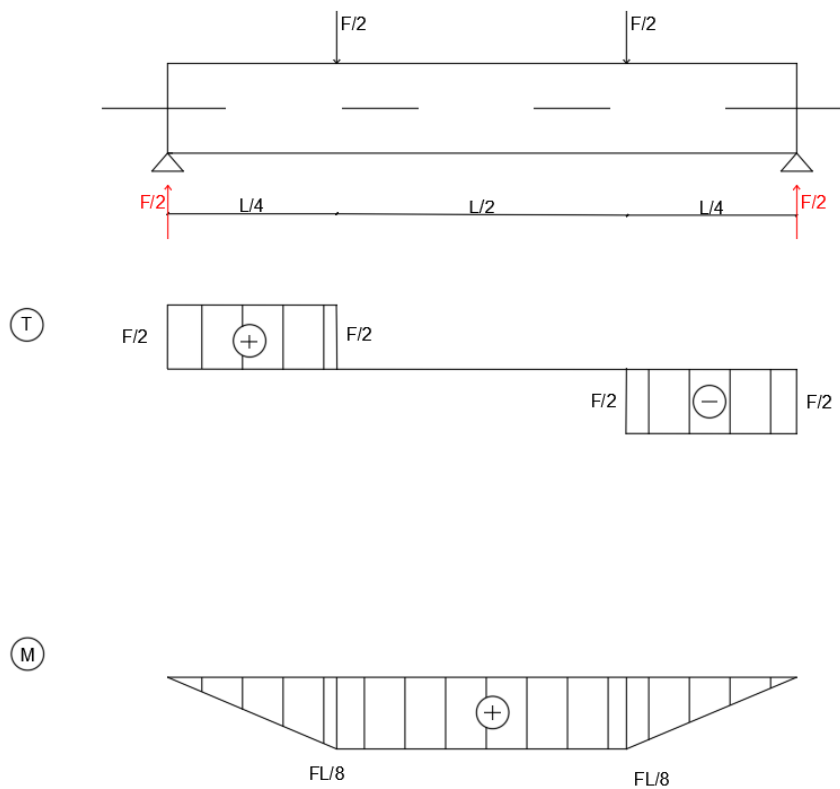
Slika 11: Definicija pozitivne i negativne kutne deformacije u koordinatnom sustavu x-z. [5]

3. PRORAČUN ZADANOG NOSAČA

Za zadanu shemu opterećenja (Slika 12) potrebno je odrediti deformacije, točnije reakcije, dijagrame poprečnih sila i momentni dijagram koji su prikazani na Slici 13.



Slika 12: Shema opterećenja.



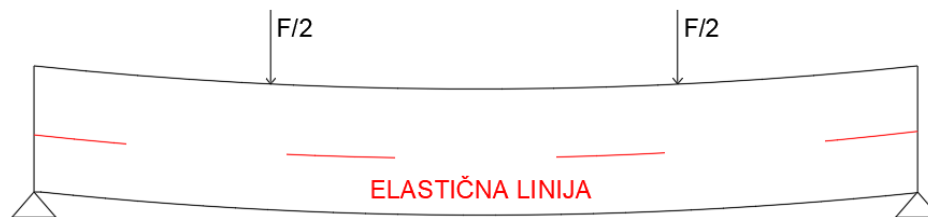
Slika 13: Dijagrami poprečnih sila i momentni dijagram.

Prema dobivenim dijagramima vidljivo je polje čistog savijanja na momentnom dijagramu (Slika 14).



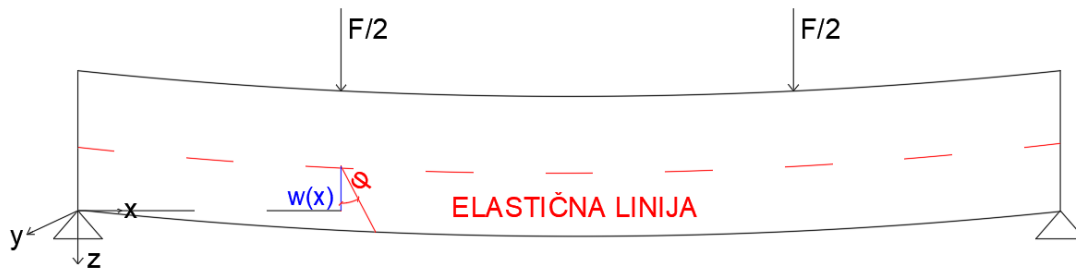
Slika 14: Područje čistog savijanja za zadanu gredu.

Kao što je ranije navedeno, dio grede podvrgnut čistom savijanju će poprimiti oblik kružnog luka (Slika 15). [2]



Slika 15: Savijanje nosača.

Funkcija $w(x)$ definira elastičnu liniju nosača. Ta veličina se naziva progib grede, te predstavlja pomak u z smjeru. Pozitivan progib se označava prema dolje. Veličina φ naziva se kut zaokreta poprečnog presjeka. Presjeci se rotiraju oko osi Y. [1]



Slika 16: Progib i kut zaokreta zadanog nosača.

Funkcije $w(x)$ i $\varphi(x)$ u potpunosti definiraju deformirano stanje grednog nosača. [1]

Diferencijalna jednačina elastične linije nosača je:

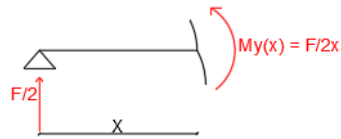
$$w'' = -\frac{M_y}{EI_y} \quad (13)$$

Ako znamo odrediti funkciju $M_y(x)$, problem se može riješiti tako da se diferencijalna jednačina elastične linije nosača integrira dva puta. [1]

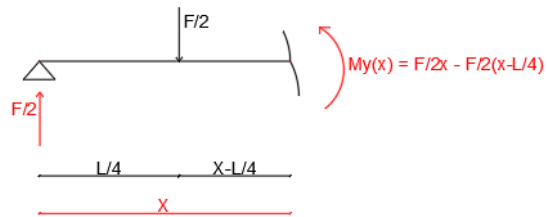
$$w(x) = -\iint \frac{M_y(x)}{EI_y} d^2x + C_1x + C_2 \quad (14)$$

Zadani sustav dijelimo u 3 segmenta (Slika 17).

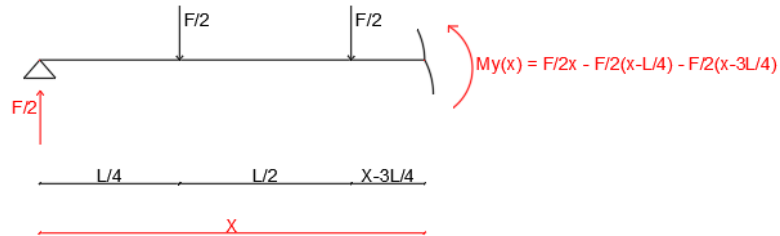
SEGMENT 1 ($x \leq L/4$):



SEGMENT 2 ($L/4 \leq x \leq 3L/4$):



SEGMENT 3 ($3L/4 \leq x \leq L$):



Slika 17: Podjela zadanog nosača u 3 segmenta.

Momentna funkcija za segment 3 je:

$$M_y(x) = \frac{F}{2}x - \frac{F}{2}\left(x - \frac{L}{4}\right) - \frac{F}{2}\left(x - \frac{3L}{4}\right), \quad (15)$$

gdje vrijedi $\left(x - \frac{L}{4}\right) \geq 0$ i $\left(x - \frac{3L}{4}\right) \geq 0$.

Integriranjem momentne funkcije dobivamo:

$$w' = \varphi(x) = \frac{1}{EI_y} \left[-\frac{F}{2} \frac{x^2}{2} + \frac{F}{2} \frac{\left(x - \frac{L}{4}\right)^2}{2} + \frac{F}{2} \frac{\left(x - \frac{3L}{4}\right)^2}{2} + C_1 \right], \quad (16)$$

$$w(x) = \frac{1}{EI_y} \left[-\frac{F x^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(x - \frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + C_1 x + C_2 \right]. \quad (17)$$

Rubni uvjeti nam daju vrijednosti konstanti C_1 i C_2 :

$$w(0) \rightarrow C_2 = 0,$$

$$w(L) \rightarrow \left[-\frac{F L^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + C_1 L \right] \rightarrow C_1 = \frac{3FL^2}{64}. \quad (18)$$

Konačni izraz za progib je:

$$w(x) = \frac{1}{EI_y} \left[-\frac{F x^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(x - \frac{L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(x - \frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{3FL^2}{64} x \right], \quad (19)$$

$$w\left(\frac{3L}{4}\right) = \frac{1}{EI_y} \left[-\frac{F \left(\frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{3L}{4} - \frac{L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{3L}{4} - \frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{3FL^2}{64} \frac{3L}{4} \right], \quad (20)$$

$$w\left(\frac{3L}{4}\right) = \frac{FL^3}{96EI_y}$$

Dok je izraz za progib na sredini nosača jednak:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{1}{EI_y} \left[-\frac{F \left(\frac{L}{2}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + \frac{F \left(\frac{L}{2} - \frac{3L}{4}\right)^3}{2 \cdot 6} + C_1 \frac{3FL^2 L}{64 \cdot 2} \right], \quad (21)$$

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5FL^3}{384EI_y}$$

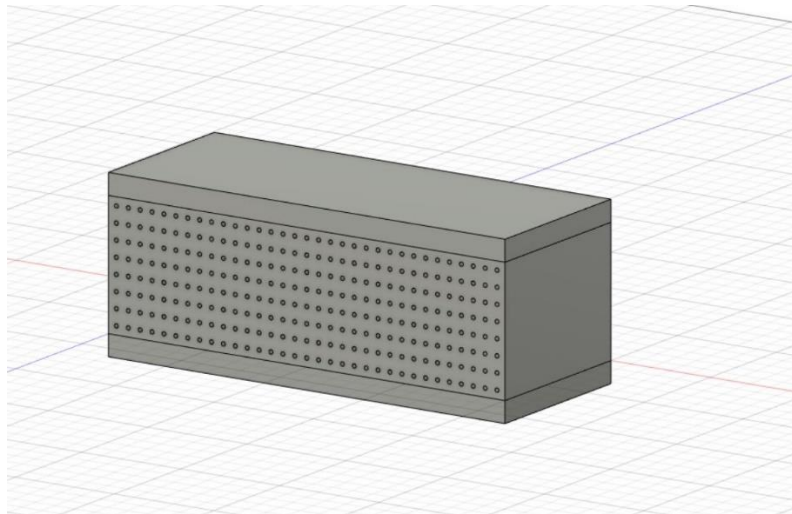
4. TRODIMENZIONALNI ZAPIS

3D ispis ili trodimenzionalan ispis je aditivna proizvodnja objekta uzastopnim polaganjem materijala. 3D ispis se sastoji od niza tehnologija koje nude mnoge mogućnosti za proizvodnju dijelova te za primjenu različitih materijala. Kod svih tehnologija se objekt stvara sloj po sloj, što je suprotno od tradicionalnih metoda proizvodnje. [6]

Početna točka bilo koje tehnologije trodimenzionalnog ispisa je 3D digitalni model, koji može biti napravljen pomoću raznih 3D softverskih programa ili pomoću 3D skenera. Za ovaj završni rad objekte smo modelirali u Autodesk Fusionu 360 i Inventoru. Važno je da se iz softverskog programa model može izvesti kao STL datoteka. STL datoteka je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u obliku mreže trokuta koja okružuje CAD model. STL datoteka se koristi za izrezivanje modela horizontalnih poprečnih presjeka. [6]

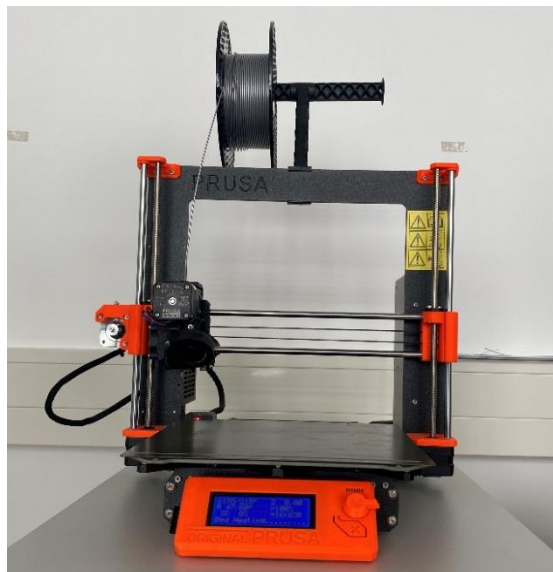
4.1. Modeliranje i ispis uzoraka za ispitivanje

Za ovaj završni rad ispisali smo 3D printerom tri uzorka različitih dimenzija. Prvi uzorak (Slika 18) se sastojao od 3 sloja te je bio duljine 10 cm, visine 4 cm i širine 4 cm. Gornji i donji sloj je debljine 0,5 cm. Srednji sloj je probušen rupama u obliku cilindra promjera 1 mm, te je osni razmak između kružnica 3 mm.

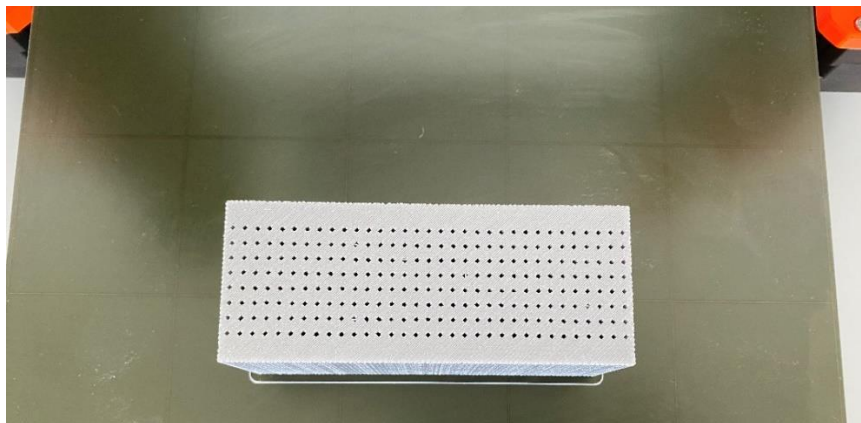


Slika 18: Model 1 u Autodesk Fusionu 360.

Uzorak (Slika 20) je printan na printeru Original Prusa i3 (Slika 19) na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Cijeli uzorak je printan od jednog materijala. Materijal korišten na 3D printeru je PLA Galaxy Silver. PLA materijal se topi na niskim temperaturama od otprilike 175 Celzijevih stupnjeva. Materijal gubi svoja mehanička svojstva na temperaturi od 60 Celzijevih stupnjeva. [7]

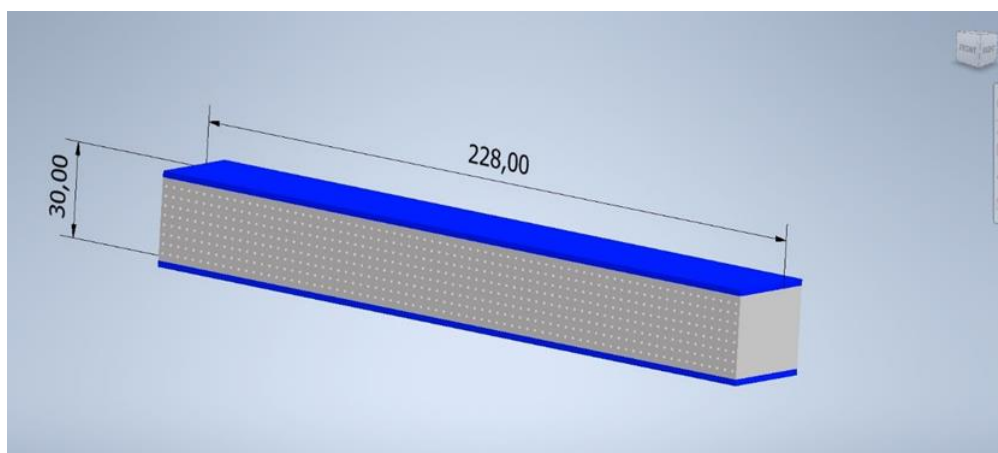


Slika 19: Original Prusa i3.



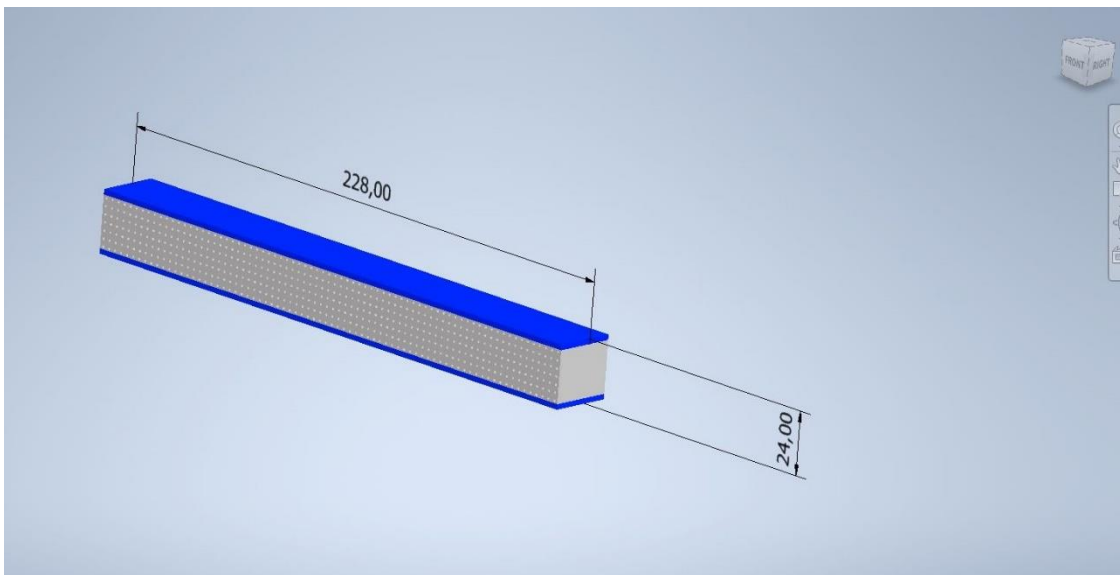
Slika 20: Model 1 isprintan na Original Prusa i3 3D printeru.

Drugi model (Slika 21) je izrađen u programu Inventor. Duljina uzorka je 22,8 cm, dimenzije poprečnog presjeka su 3 x 3 cm, gdje su gornji i donji sloj debljine 0,2 cm. Srednji sloj je visine 2,6 cm, te je oslabljen cilindričnim šupljinama koje se protežu okomito na duljinu uzorka i usporedno s gornjim i donjim slojem. Cilindrične rupe su promjera 1 mm i nalaze se na osnovnom razmaku od 3 mm, kao i kod prvog modela.



Slika 21: Model 2 u programu Inventor, dimenzije u mm.

Treći model (Slika 22) je također izrađen u programu Inventor. Duljina uzorka je 22,8 cm, dimenzije poprečnog presjeka su 2,4 x 2,4 cm, a debljina gornjeg i donjeg sloja iznosi 0,2 cm. Srednji sloj je visine 2 cm, te je oslabljen cilindričnim šupljinama koje se protežu okomito na duljinu uzorka i usporedno s gornjim i donjim slojem. Cilindrične rupe su promjera 1 mm i nalaze se na osnom razmaku od 3 mm, kao i kod prvog modela.



Slika 22: Model 3 u programu Inventor, dimenzije u mm.

5. KORIŠTENA OPREMA

5.1. Aramis optički mjerni sustav

Za potrebe testiranja smo koristili sustav GOM Aramis za mjerenje pomaka i softver Correlate pri obradi podataka.

Aramis je sustav stereo 3D kamera (Slika 23) koji služi za statička i dinamička 3D mjerenja na površini. Mjeri 3D koordinate na temelju stohastičkog uzorka ili pomoću mjernih oznaka, tzv. referentnih točaka. Model je potrebno pripremiti ljepljenjem referentnih točaka koje sustav koristi kao markere i nanošenjem stohastičkog crno-bijelog uzorka na cijelu površinu uzorka. Aramis 3D precizno mjeri 3D koordinate, pomake, brzine i ubrzanja površine ispitanog uzorka, odnosno za proračun 3D pomaka, brzina i deformacija koriste se koordinate koje se direktno dobiju kao rezultati mjerenja. Sve dobivene vrijednosti se mogu obraditi i prikazati u Excel-u ili drugom sličnom programu. [8]



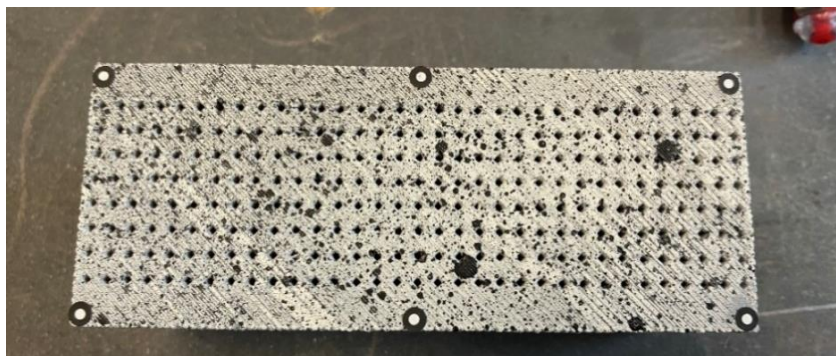
Slika 23: Aramis sustav 3D kamera.

Modeli sa stohastičkim uzorkom daju rezultate mjerenja u svim točkama uzorka za ispitivanje, odnosno na cijeloj površini uzorka, dok zaljepljene točke daju diskretne rezultate samona mjestima gdje se nalaze. [8]

GOM Correlate je softver koji služi za obradu podataka, dobivenih optičkim mjerenjem. Korelacija digitalne slike optička je beskontaktna metoda za dobivanje 3D koordinata u prostoru koja omogućuje procjenu površina, gibanja i deformacija. Koristeći referentne točke ili stohastički uzorak područja slike se mogu opisati s točnošću od podpiskela. Softver će u tom slučaju moći izračunati promjene položaja točaka na površini objekta. [9]

5.2. Priprema uzorka i optičkog mjernog sustava

Priprema uzorka počinje nanošenjem uzroka nepravilne boje na površinu testnog modela. Prvo se nanosi bijeli sloj raspršivačem kao podloga. Potrebno je da površina modela bude što svjetlija, a uzorak nanesen preko njega što tamniji kako bi kamere pratile cijelu površinu tijekom rada. U ovom slučaju nanijeli smo bijelu podlogu u dva sloja. Zatim smo upotrijebili raspršivač boje za nanošenje mrlja, kako bismo dobili uzorak nepravilnih točkica koje kamere mogu prepoznati. Na kutevima testnog modela smo zalijepili referentne točke pomoću kojih se može definirati orijentacija koordinatnog sustava i preciznije odrediti pomaci na tim mjestima.



Slika 24: Pripremljeni uzorak za ispitivanje.

Za potrebe svih ispitivanja koristili smo leće promjera 12 mm. Veličina uzorka za ispitivanje nam definira mjerni volumen. Mjerni volumen na koji smo kalibrirali kamere iznosi 315 / 260 / 260 mm. Međusobna udaljenost kamera od plohe koju pratimo iznosi 353 mm.

5.3. Kidalica za ispitivanje

Ispitivanja su provedena u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci na univerzalnom tlačno-vlačnom stroju (kidalici) Zwick/Roell Z600 koji je prikazan na Slici 25.



Slika 25: Kidalica Zwick/Roell Z600 u laboratoriju za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Kidalica je podjeljena na dva radna prostora, te su ispitivanja provedena u donjem prostoru pri čemu je mjerna doza spuštена prema dolje i podešena za ugradnju ispitnog uzorka. [10]

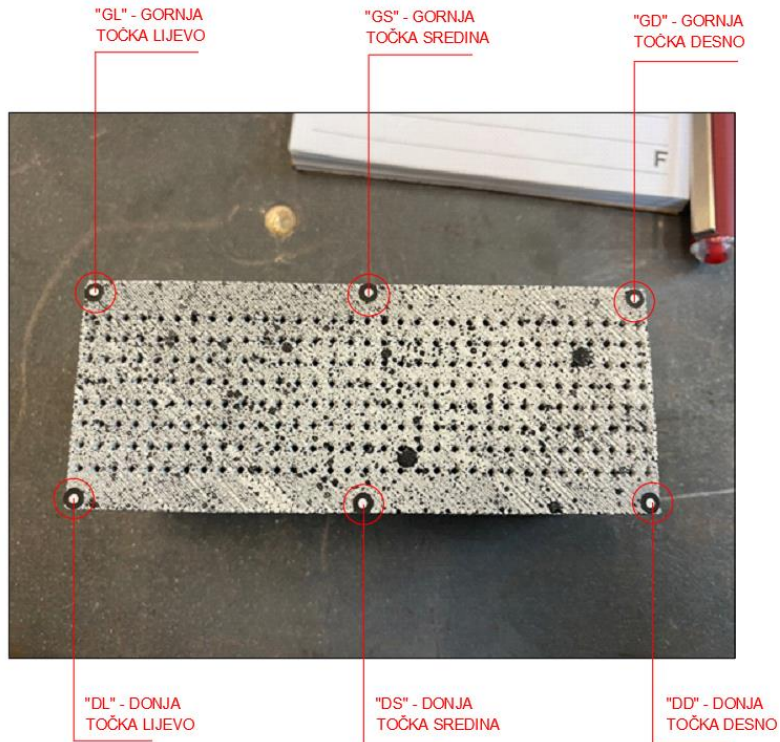
6. OPIS ISPITIVANJA I REZULTATI

6.1. Pregled ispitivanja i rezultati

Provedena su ispitivanja na tri uzorka istog materijala, ali različitih dimenzija. Izrađeni uzorci su napravljeni u 3D CAD programima i na sebi imaju oslabljenja, točnije cilindrične šupljine koje se protežu okomito na duljinu uzorka i usporedno s gornjim i donjim slojem, kao što je ranije opisano. Cilj ovih ispitivanja je slomiti uzorke, gdje se smanjenjem međusobnog razmaka između sila povećava unutarnji moment u zoni čistog savijanja, što također utječe na povećanje vlačnih naprezanja. Na taj način se približavamo vlačnoj čvrstoći materijala.

Rezultati koji su dobiveni u ovim ispitivanjima prikazani su dalje u tekstu u obliku dijagrama. Ispitivanja su izvršena na tri uzorka, te su prikazani rezultati od svih ispitivanja. Pomaci točaka su definirani oznaka „DD, DL, GD, GL, GS, DS“ koje označuju pozicije točaka na uzorku.

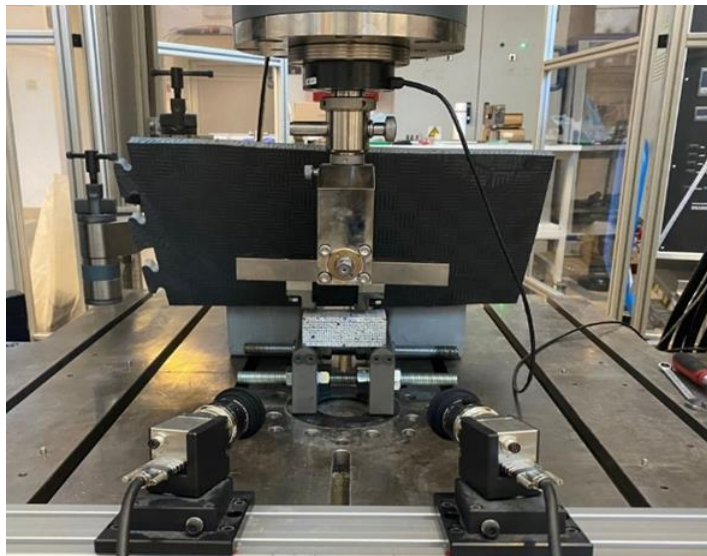
Na Slici 26 prikazan je uzorak s referentnim točkama i njihovim oznakama, koje će biti korištene u sljedećim dijagramima.



Slika 26: Označavanje uzorka.

6.1.1. Ispitivanje 1

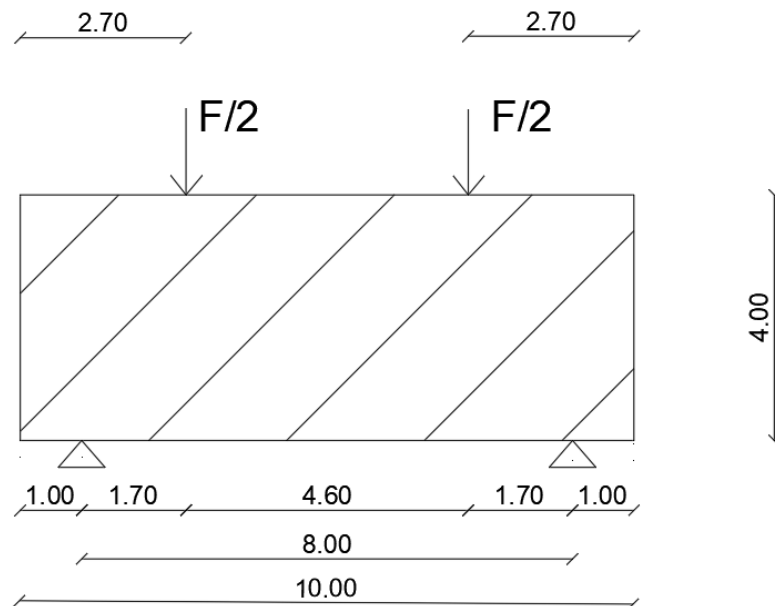
Prilikom prvog ispitivanja korišten je model 1, duljine 10 cm i visine 4 cm. Na Slici 27 prikazan je ugrađen uzorak za ispitivanje u kidalici.



Slika 27: Prikaz ugrađenog uzorka za ispitivanje.

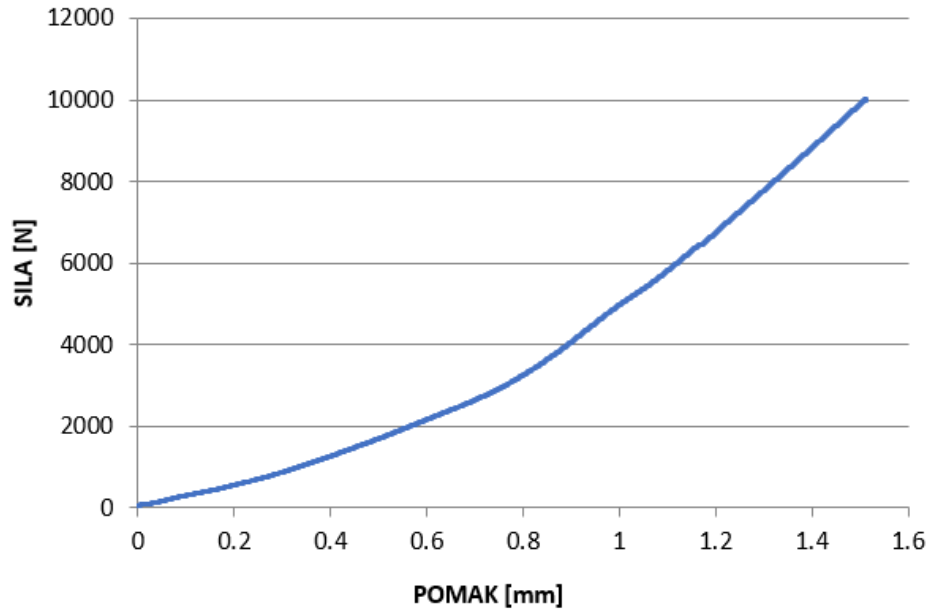
Za ovo ispitivanje razmak između oslonaca iznosi 8 cm, dok je duljina cijelog uzorka 10 cm. Kako ne bi došlo do klizanja uzorka, uzorak se mora postaviti simetrično na oslonac na način da su mu krajnje točke udaljene 1 cm od oslonca.

Uzorak opterećujemo dvjema vertikalnim silama kako bismo dobili polje čistog savijanja. Sile su od ruba uzorka udaljene 2,7 cm, te je statički sustav za slučaj 1 prikazan na Slici 28.



Slika 28: Shema opterećenja u cm.

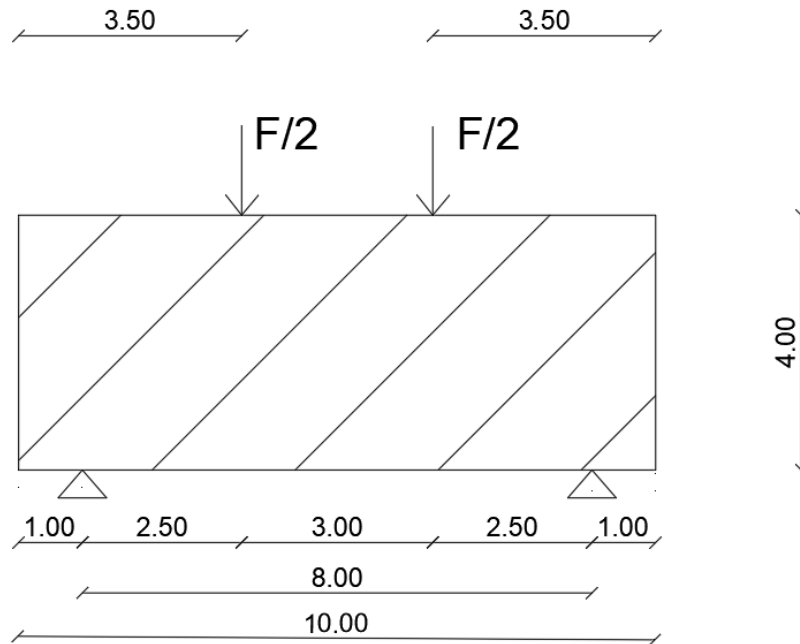
Na Slici 29 prikazani su podaci s kidalice, dijagram sila – pomak. Na dijagramu možemo vidjeti da nije došlo do sloma uzorka prilikom nanošenja sile do maksimalno 10 kN.



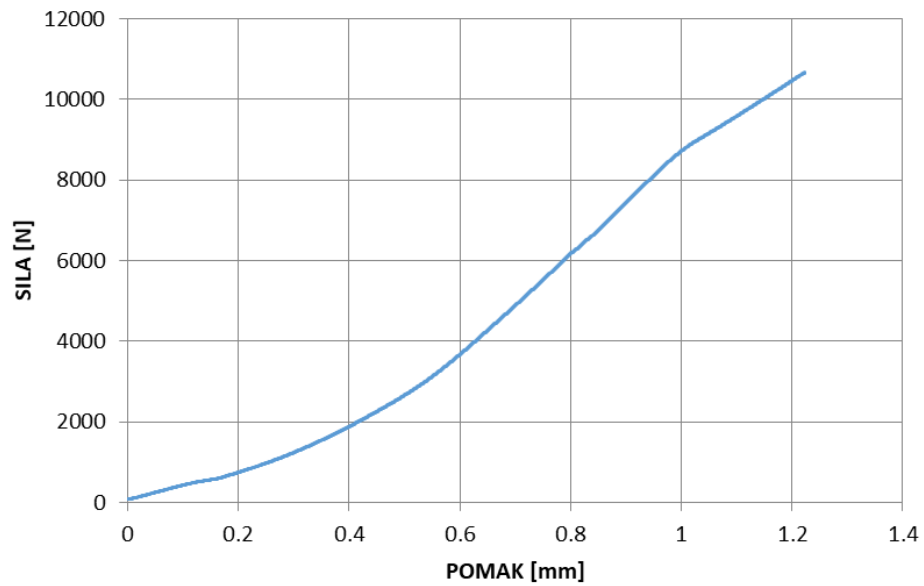
Slika 29: Dijagram sila – pomak za udaljenost sila 2,7 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.

Zbog neuspjelog ispitivanja gdje se uzorak nije uspio slomiti, sile smo od ruba uzorka pomaknuli za 3,5 cm i ponovo ga opteretili. Statički sustav je prikazan na Slici 30.

Razmak između oslonaca ponovno iznosi 8 cm, kao i kod prethodnog ispitivanja. Na Slici 31 su prikazani rezultati iz kidalice, dijagram sila – pomak. Na navedenom dijagramu se može vidjeti da ponovo nije došlo do loma uzorka.

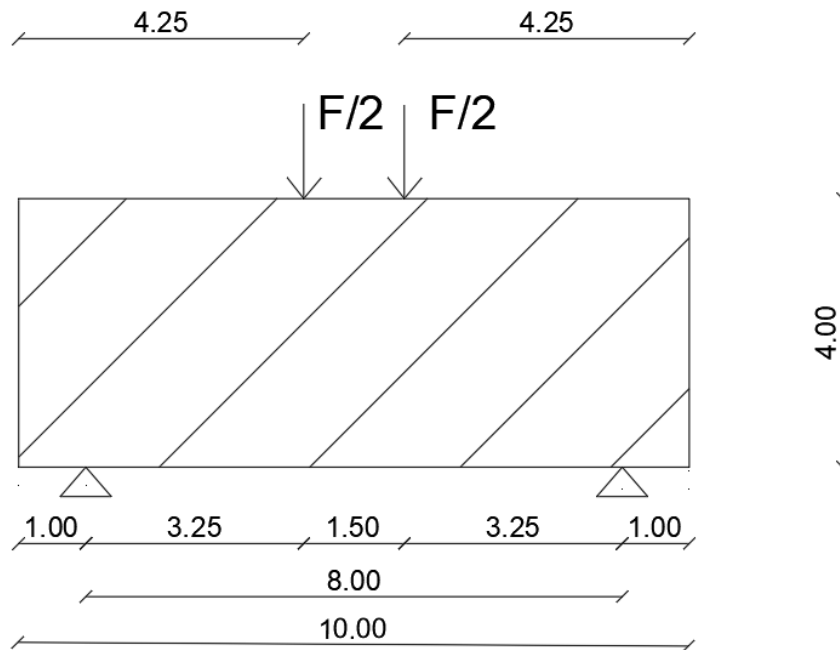


Slika 30: Shema opterećenja u cm.



Slika 31: Dijagram sila – pomak za udaljenost sila 3,5 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.

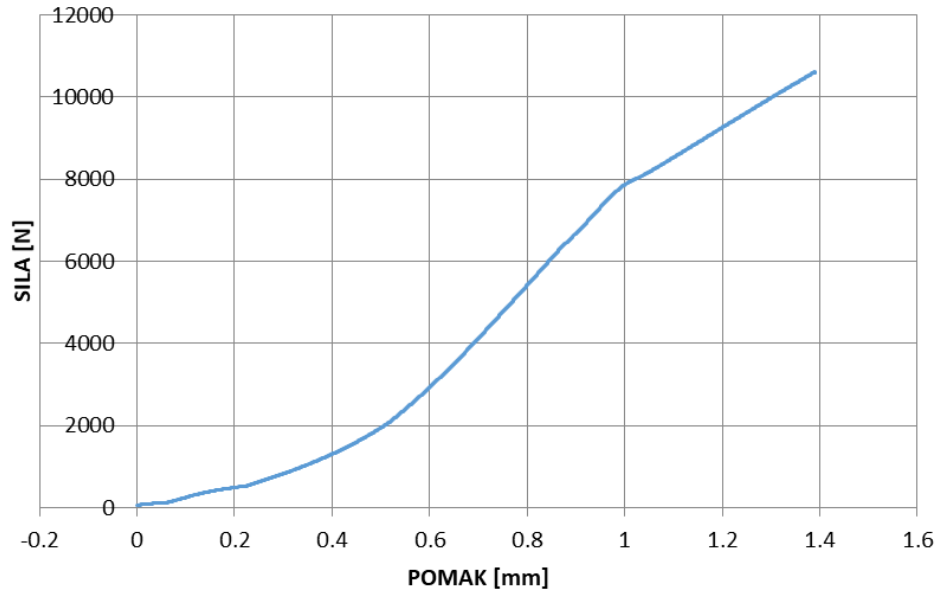
S obzirom da se uzorak ponovo nije uspio slomiti, sile od ruba pomičemo za 4,25 cm i još jednom opterećujemo. Shema opterećenja uzorka je prikazana na Slici 32.



Slika 32: Shema opterećenja u cm.

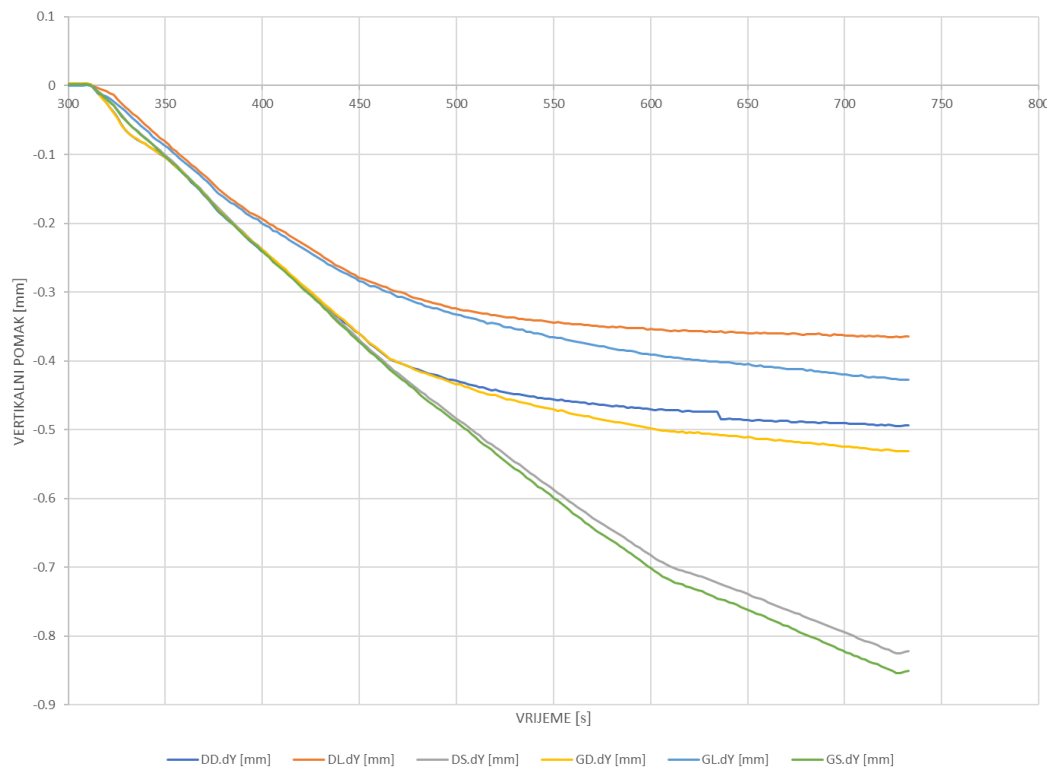
Na Slici 33 su prikazani rezultati iz kidalice, dijagram sila – pomak, na kojem se može vidjeti da i u ovom slučaju nije došlo do loma materijala prilikom nanošenja sile od maksimalno 10 kN.

Zbog velike debljine (4 cm) i male duljine (10 cm) uzorak opterećivanjem maksimalnom silom od 10 kN uzorak se nije uspio slomiti. U sljedećim ispitivanjima su korišteni znatno vitkiji uzorci.



Slika 33: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,25 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 4x4 cm.

Na Slici 34, prikazani su rezultati ispitivanja. Prikazan je dijagram vertikalnih pomaka ispitanog uzorka poprečnog presjeka 4x4 cm. Dijagram započinje od 300-te sekunde kada se mogu vidjeti pomaci točaka. Uzorak je opterećen sa dvije sile, te je razmak sila od ruba nosača 4,25 cm. Tijekom ovog ispitivanja nije došlo do sloma uzorka, što se može vidjeti u dijagramu.



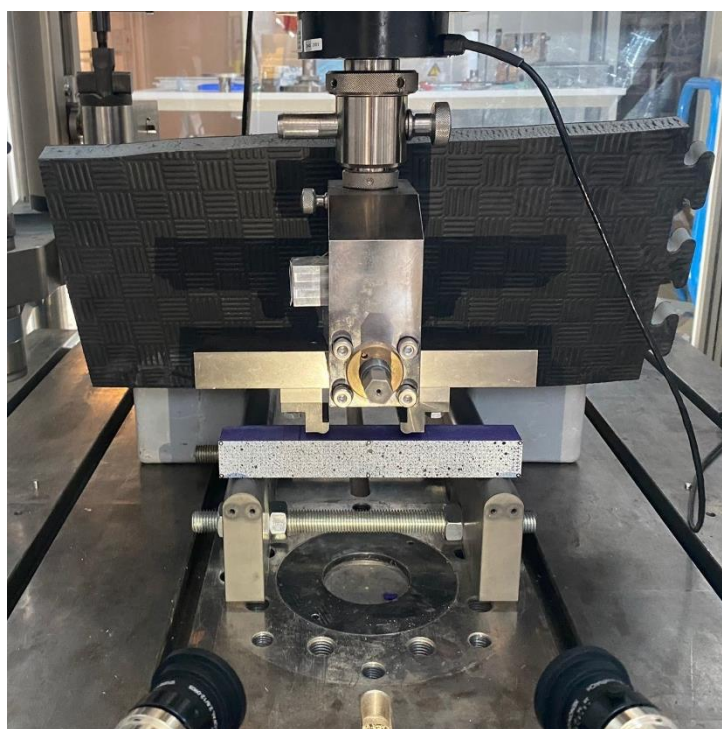
Slika 34: Dijagram vertikalnog pomaka uzorka 1 poprečnog presjeka 4x4cm s razmakom sila 4,25 cm od ruba.

6.1.2. Ispitivanje 2

Prilikom drugog ispitivanja, priprema uzorka je bila jednaka kao i kod prethodnog ispitivanja. Kod ovog ispitivanja korišten je uzorak duljine 22,8 cm, dimenzija poprečnog presjeka 3 x 3 cm (Slika 35). Pripremljeni uzorak postavljamo u kidalicu (Slika 36).

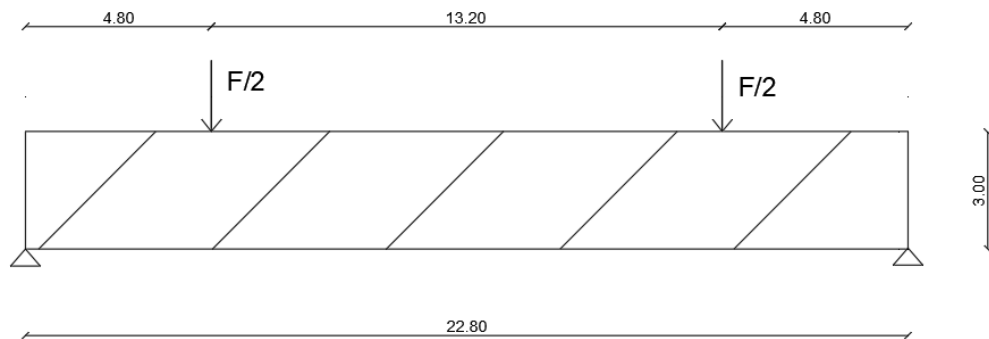


Slika 35: Pripremljeni uzorak za ispitivanje 2.



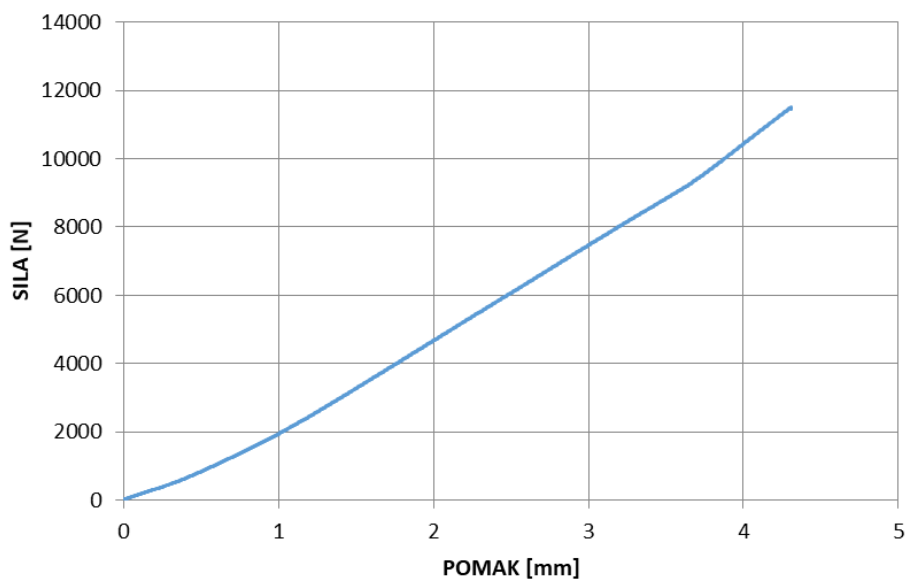
Slika 36: Prikaz ugrađenog uzorka za ispitivanje.

Uzorak ponovno opterećujemo dvjema vertikalnim silama kako bismo dobili polje čistog savijanja. Razmak između vertikalnih sila iznosi 13,2 cm, dok razmak između sile i oslonca iznosi 4,8 cm. Statički sustav prikazan je na Slici 37.



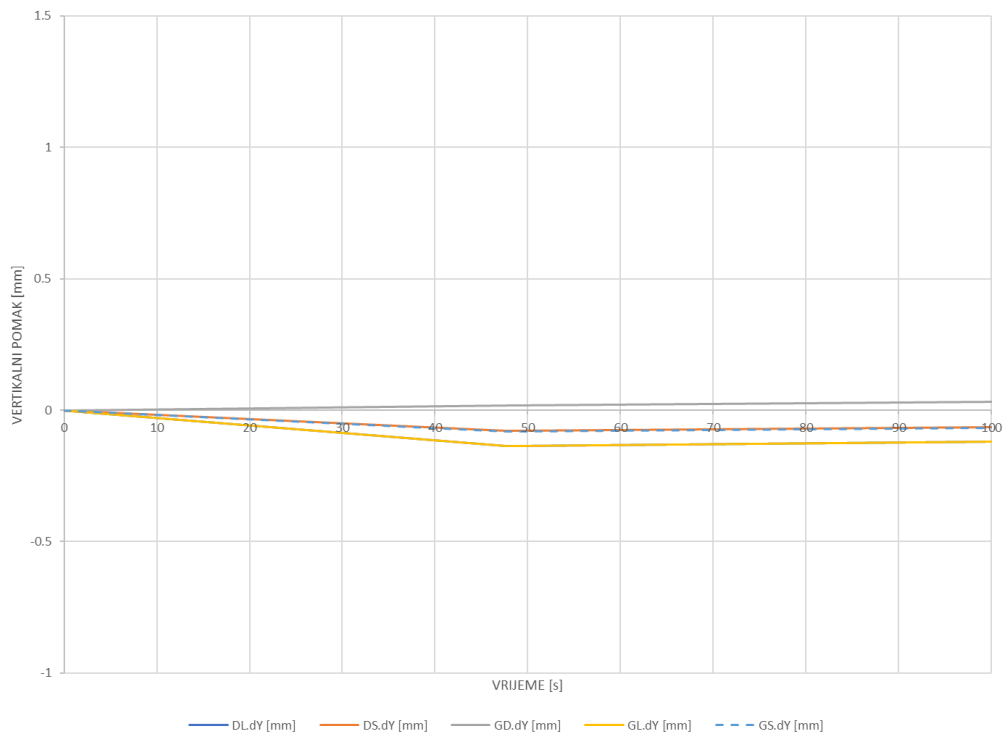
Slika 37: Shema opterećenja u cm.

Na Slici 38 su prikazani rezultati iz kidalice, dijagram sila – pomak, na kojem se može vidjeti da i u ovom slučaju nije došlo do loma uzorka pri likom nanošenja sile od maksimalno 10 kN. Iz tog razloga smanjujemo razmak između sila te ponavljamo ispitivanje.



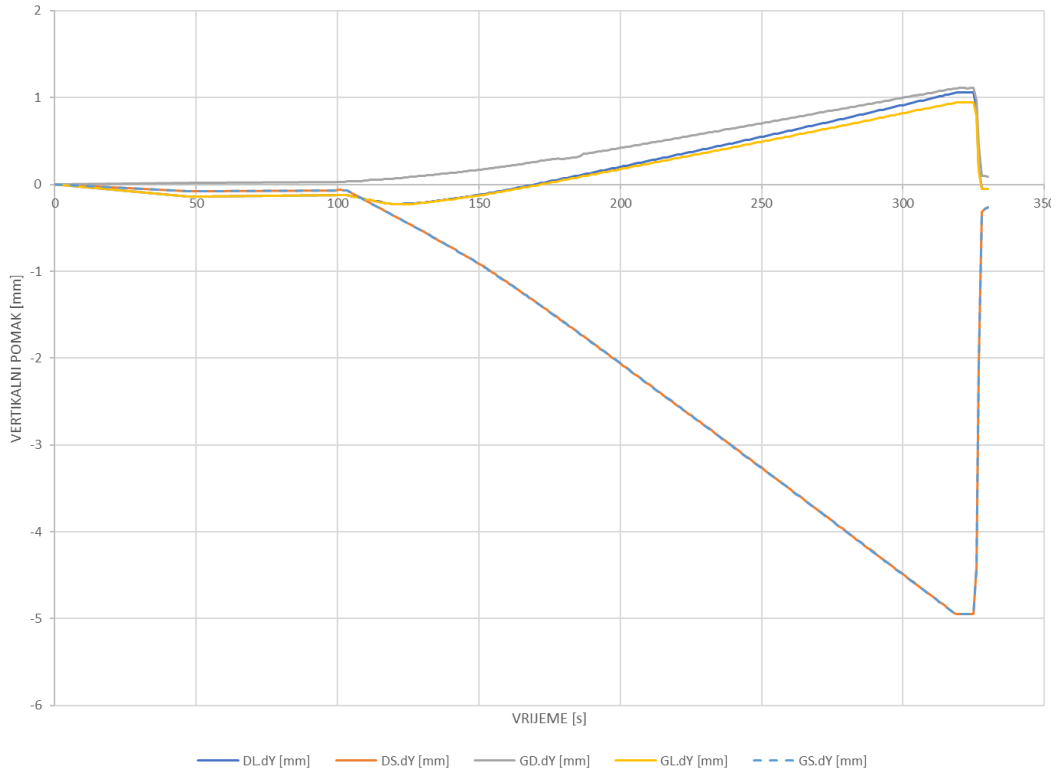
Slika 38: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,8 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 3x3 cm.

Na Slici 39 prikazani su rezultati ispitivanja gdje možemo vidjeti početak vertikalnog pomaka točaka na dijagramu za uzorak poprečnog presjeka 3x3 cm, prilikom faze predopterećenja uzorka. To uključuje nalijevanje uzorka na oslonce.



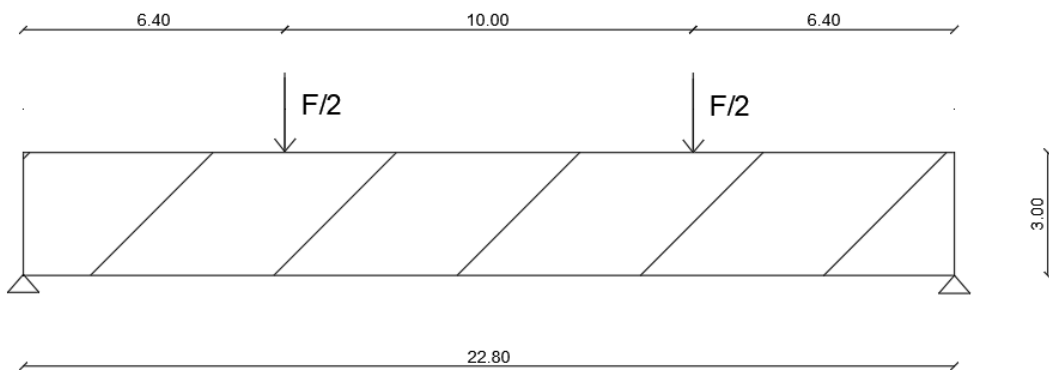
Slika 39: Dijagram početka vertikalnog pomaka točaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.

Na Slici 40 iz dijagrama vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba možemo vidjeti da referentne točke u sredini (gornja i donja) imaju negativan pomak, dok ostale točke imaju pozitivan pomak. Točke koje se nalaze na uzorku su izvan oslonca (Slika 36) se neće pomicati kao točke koje se nalaze u sredini i opterećene su s dvije sile koje ih pritišću prema dole. Tijekom ovog ispitivanja također nije došlo do sloma uzorka.



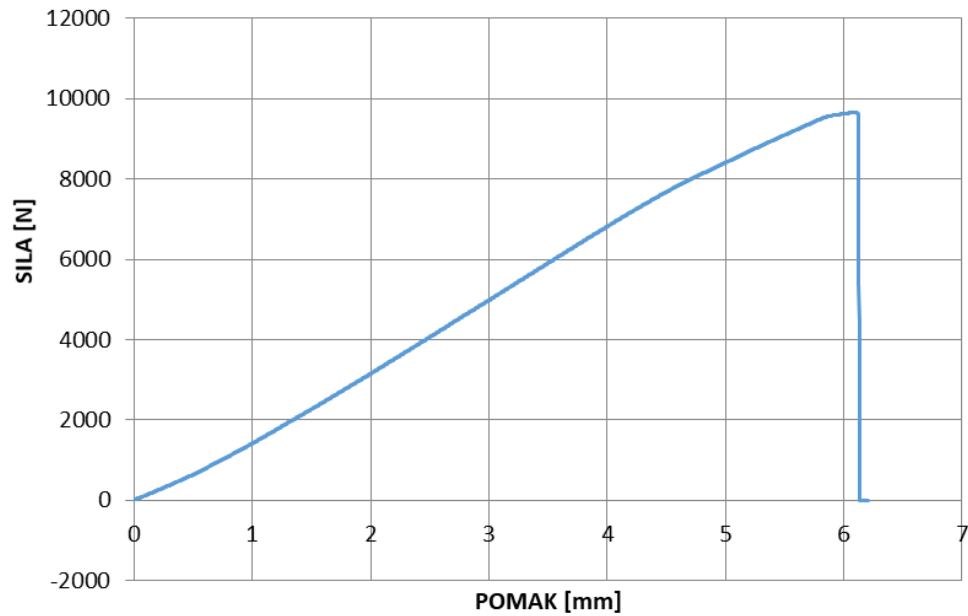
Slika 40: Dijagram vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.

Uzorak istih dimenzija ponovo opterećujemo dvjema vertikalnim silama kako bismo dobili polje čistog savijanja. Razmak između vertikalnih sila iznosi 10 cm, dok razmak između sile i oslonca iznosi 6,4 cm. Statički sustav prikazan je na Slici 41.

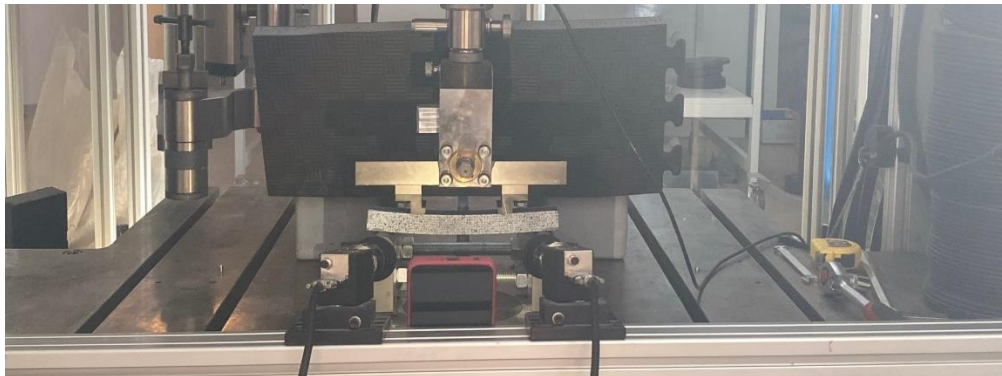


Slika 41: Shema opterećenja u cm.

Na Slici 42 su prikazani rezultati iz kidalice, dijagram sila – pomak, na kojem se može vidjeti da u ovom slučaju dolazi do značajne deformacije (Slika 43) i loma uzorka (Slika 44) prilikom nanošenja sile od 10 kN.



Slika 42: Dijagram sila – pomak za raspon sila 6.4 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 3x3 cm.

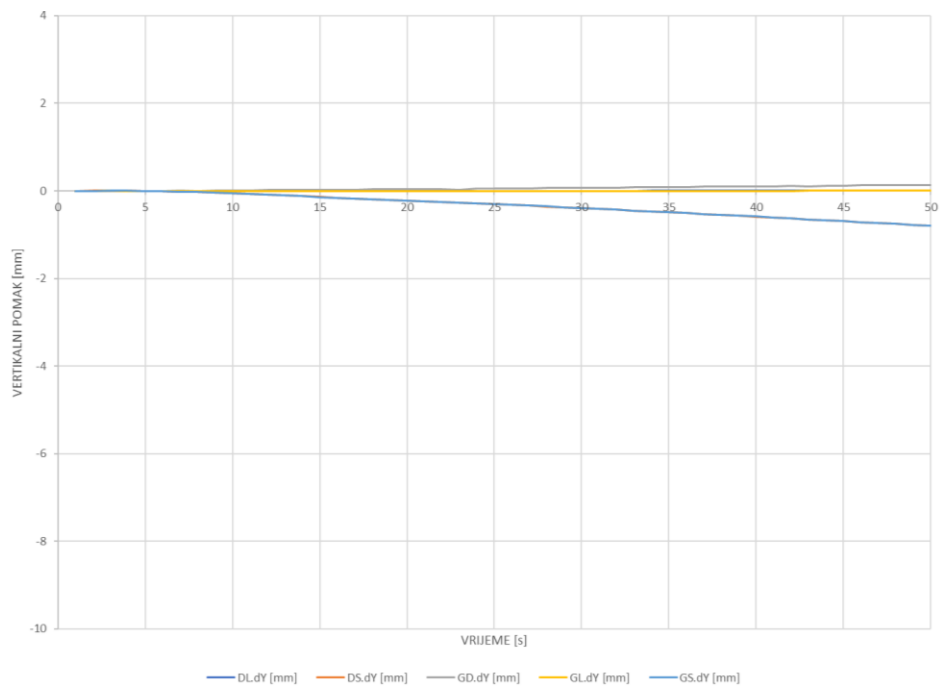


Slika 43: Deformirani uzorak u kidalici.



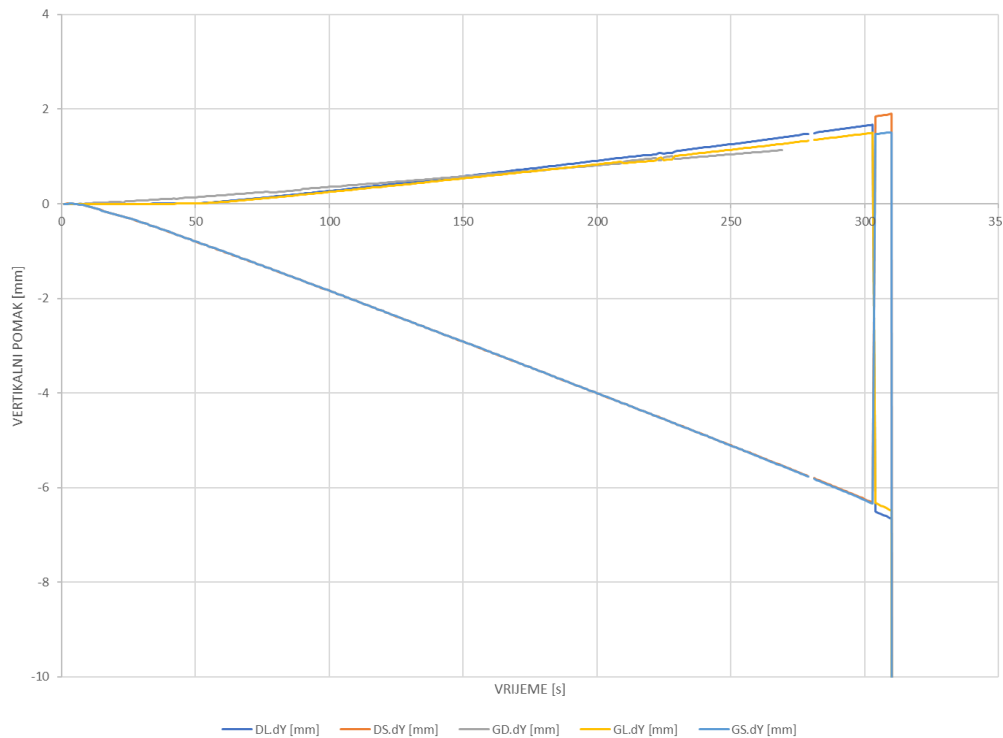
Slika 44: Slomljeni uzorak nakon ispitivanja.

Na Slici 45 prikazan je dijagram početka vertikalnog pomaka ispitanog uzorka poprečnog presjeka 3x3 cm, koji ponovo prati fazu predopterećenja uzorka. Naizgled veliki pomaci suprotnog predznaka na kraju su rezultat greške mjernog sustava.



Slika 45: Dijagram početka vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 6,4 cm od ruba.

Na Slici 46 prikazani su rezultati ispitivanja preko dijagrama vertikalnog pomaka ispitanog uzorka poprečnog presjeka 3x3 cm gdje je bio razmak sila od ruba nosača 6,4 cm. Tijekom ovog ispitivanja dolazi do loma uzorka nakon 300 sekundi.



Slika 46: Dijagram vertikalnog pomaka za uzorak 2 poprečnog presjeka 3x3cm s razmakom sila 6,4 cm od ruba.

Prema formuli za progib na sredini nosača, možemo odrediti progib za uzorak 2 koji je jednak:

$$w \left(\frac{228}{2} \right) = \frac{5 * 10^4 * 228^3}{384 * EI_y}, \quad (22)$$

$$w (114 \text{ mm}) = \frac{1543275000}{EI_y} [\text{mm}]$$

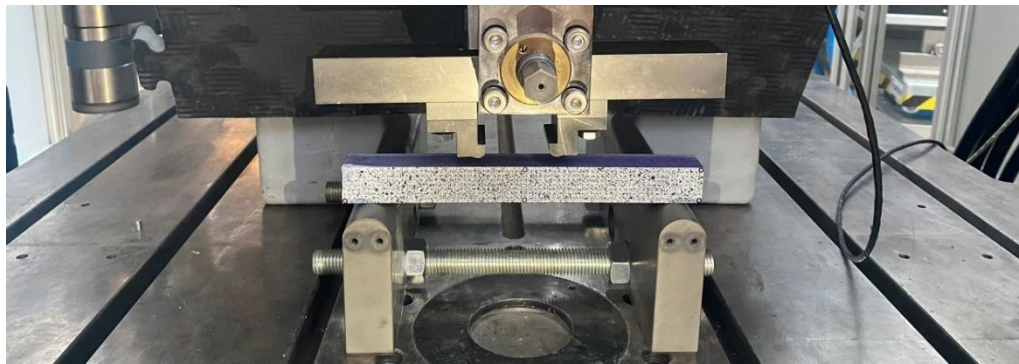
6.1.3. Ispitivanje 3

Prilikom trećeg ispitivanja, priprema uzorka je bila jednaka kao i kod prethodnih ispitivanja. Kod ovog ispitivanja korišten je uzorak duljine 22,8 cm, dimenzija poprečnog presjeka 2,4 x 2,4 cm (Slika 47).



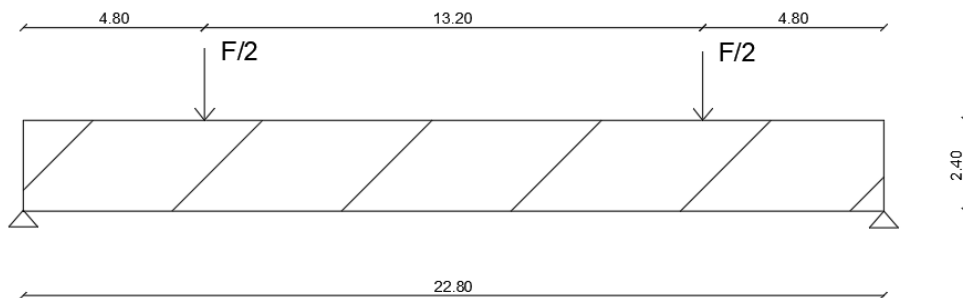
Slika 47: Pripremljeni uzorak za ispitivanje.

Nakon što se uzorak pripremio za ispitivanje postavlja se u kidalicu (Slika 48).



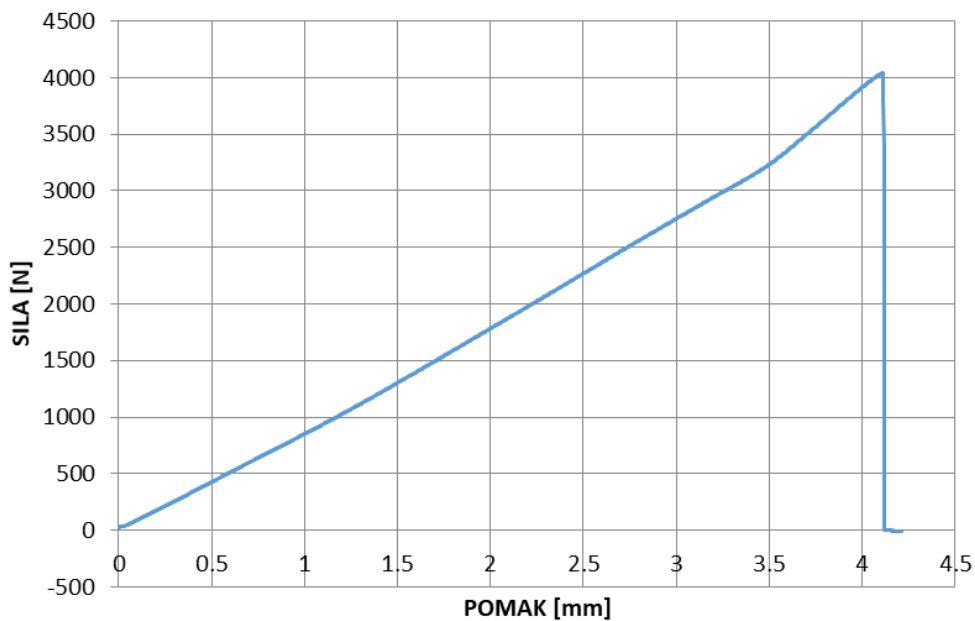
Slika 48: Prikaz uzorka u kidalici.

Uzorak opterećujemo dvjema vertikalnim silama. Razmak između vertikalnih sila iznosi 13,2 cm, dok razmak između sile i oslonca iznosi 4,8 cm. Statički sustav prikazan je na Slici 49.

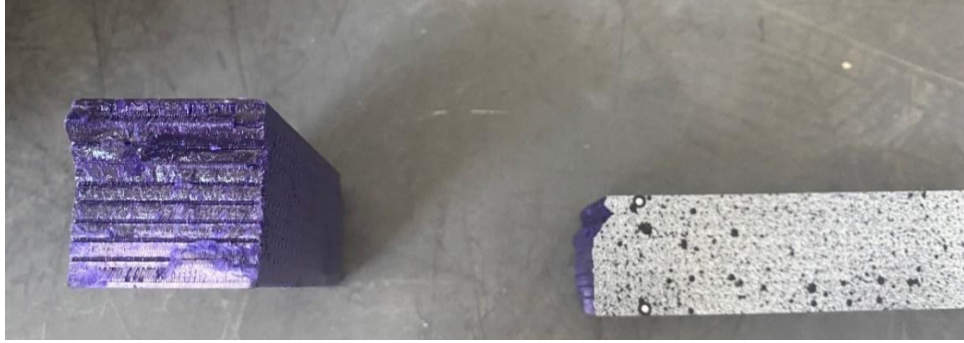


Slika 49: Shema opterećenja u cm.

Na Slici 50 su prikazani rezultati iz kidalice, dijagram sila – pomak, na kojem se može vidjeti da dolazi do loma materijala (Slika 51) prilikom nanošenja sile od 4 kN.

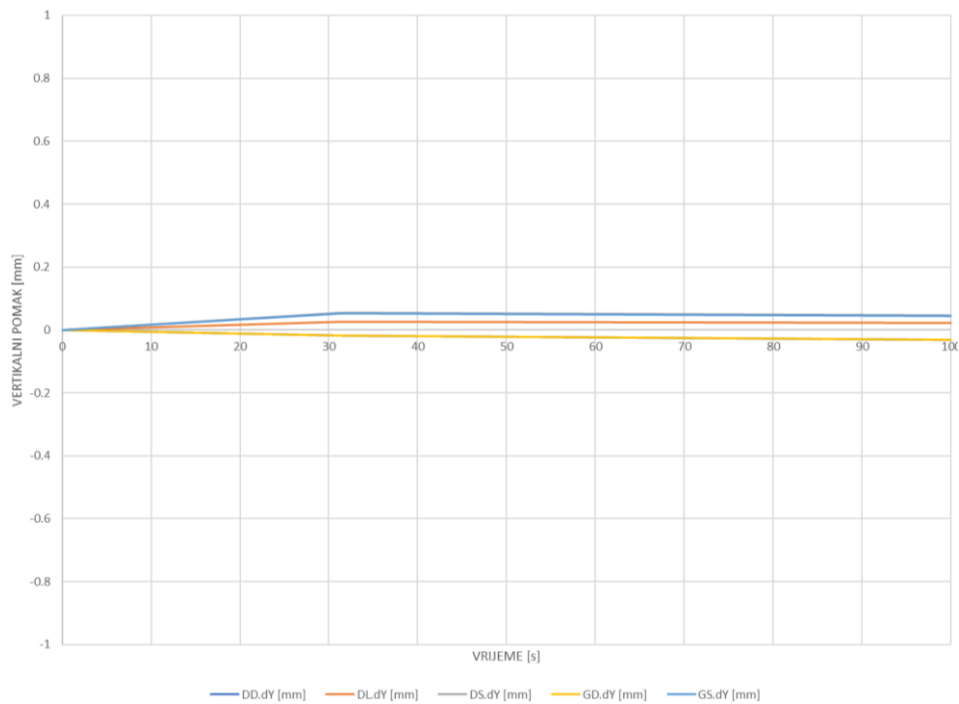


Slika 50: Dijagram sila – pomak za raspon sila 4,8 cm od ruba na uzorku poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm.

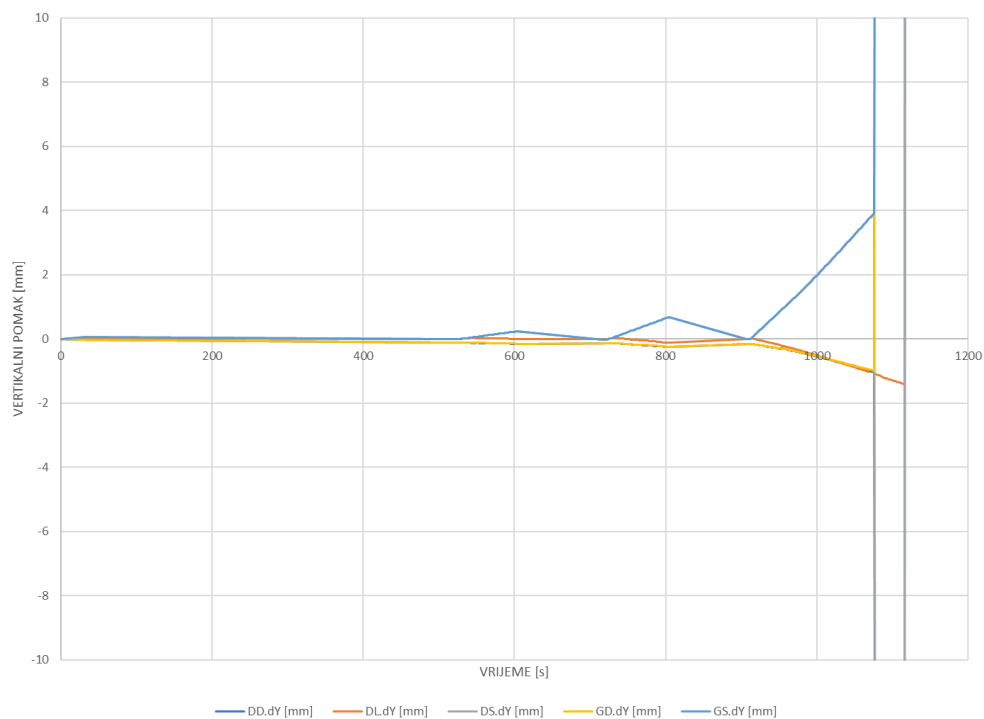


Slika 51: Slomljeni uzorak nakon ispitivanja.

Na Slici 52 prikazani su rezultati ispitivanja preko vertikalnog pomaka u fazi predopterećenja ispitanog uzorka 3. Na Slici 53 je prikazan dijagram vertikalnog pomaka istog uzorka. Uzorak je opterećen s dvije sile te je razmak sila od ruba nosača jednak 4,8 cm. Tijekom ovog ispitivanja dolazi do loma uzorka nakon 1000 sekundi.



Slika 52: Dijagram početka vertikalnog pomaka uzorka 3 poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.



Slika 53: Dijagram vertikalnog pomaka uzorka 3 poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm s razmakom sila 4,8 cm od ruba.

Prema formuli za progib na sredini nosača, možemo odrediti progib za uzorak 3 koji je jednak:

$$w\left(\frac{228}{2}\right) = \frac{5 * 4 * 10^3 * 228^3}{384 * EI_y}, \quad (23)$$

$$w(114 \text{ mm}) = \frac{617310000}{EI_y} [\text{mm}]$$

7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana eksperimentalna analiza savijanja 3D printanog uzorka. Izrađena su tri uzorka različitih dimenzija. Poprečnog presjeka 4x4 cm, 3x3 cm i 2,4x2,4 cm. Kod ispitivanja prvog uzorka pomicanjem sila od ruba nosača nismo uspjeli slomiti uzorak te su izrađena još dva uzorka manjih poprečnih presjeka. Kod drugog ispitivanja uzorka poprečnog presjeka 3x3 cm dolazi do sloma povećanjem udaljenosti sila od ruba nosača. Kod trećeg ispitivanja uzorka poprečnog presjeka 2,4x2,4 cm također dolazi do sloma. Nakon obrade podataka i analize dijagrama, zaključujemo da dimenzije poprečnih presjeka utječu na veličinu sile koja je potrebna da slomi uzorak, gdje je kod uzorka s većim poprečnim presjekom potrebna veća sila, a kod uzorka s manjim poprečnim presjekom manja sila. Kod proračuna progiba možemo zaključiti da kod uzorka s većim poprečnim presjekom imamo veći moment tromosti površine 2. reda, pa je progib manji nego kod uzorka s manjim poprečnim presjekom. Također, smanjenjem razmaka između sila, točnije približavanjem sila sredini raspona nosača, dobivamo povećanje unutarnjeg momenta u zoni čistog savijanja što znači također i veća vlačna naprezanja pa se na taj način približavamo vlačnoj čvrstoći materijala.

LITERATURA

- [1] Škec Leo, Otpornost materijala I – predavanja, Građevinski fakultet u Rijeci.
- [2] Šimić Vice, Otpornost materijala I, Školska knjiga, Zagreb 2002.
- [3] Malešević Ana, Eksperimentalna analiza savijanja 3D printanog uslojenog materijala, završni rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, 2021.
- [4] Alfirević Ivo, Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga Zagreb.
- [5] Kubik Kristijan, Analitička usporedba Euler-Bernoullijeve i Timošenkove teorije savijanja grede, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [6] Budimir Ivona, 3D PRINTERI, završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci, 2015.
- [7] <https://www.prusa3d.com/product/prusament-pla-galaxy-silver-1kg/>, 03.08.2022.
- [8] GOM Webinar - Optical 3D Metrology for Civil Engineering, https://www.youtube.com/watch?v=W4BFY_eqwGo&list=PLuGIgkKQklonyTkpLORuzj8jLt3xAUEGZ, 22.08.2022.
- [9] GOM Correlate – Digital Image Correlation, <https://www.scan-xpress.com.au/products/software/gom-suite/gom-correlate/>, 10.09.2022.
- [10] Krolo Paulina, Utjecaj ponašanja vijčanih priključaka na potresni odziv čeličnih okvira, doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, 2017.