



**Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet**

Master akademske studije

PROIZVODNO MAŠINSTVO

Mikro obrada i karakterizacija

- Seminarski rad -

Lukovičasta kupola

Overio (potpis/datum):

Studenti: Natalija Lazarević 1070/23 (uvod+štampa)

Miloš Pešterac 1142/23 (modeliranje)

Aleksa Brajović 1226/23 (merenje)

Grupa: 4

Profesor: prof. dr Božica Bojović

Šk. godina: 2025/26.

Datum: 26.01.2026.

Beograd

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Podela samonosećih struktura.....	1
1.2. Predmet projektnog zadatka – kupola.....	4
1.3. Mikro obrada.....	5
2. PROJEKTOVANJE KUPOLE	6
3. IZRADA KUPOLE	9
3.1. Fotopolimerizacija u kadi – <i>Vat photopolymerization</i>	10
3.2. Varijacije kupole	11
3.3. Priprema za štampu.....	14
3.4. Postprocesiranje	19
3.5. Rezultati štampe.....	19
3.6. Simulacija	20
4. MERENJE	22
4.1. Mikroskop.....	22
4.2. Merenje	23
4.3. Analiza dobijenih rezultata merenja	26
5. ZAKLJUČAK	27
6. LITERATURA	28

1. UVOD

Samonoseće strukture predstavljaju forme koje mogu stajati i trpeti opterećenje bez potrebe za unutrašnjim potpornim elementima poput stubova i zidova. Njihova specifična geometrija omogućava stabilnost konstrukcije prenošenjem opterećenja na oslonce u osnovi ovakvih struktura, čime se ostvaruju znatne uštede u materijalu, pouzdanost konstrukcije, pozitivan estetski dojam, kao i druge prednosti. Geometrije i oblici koji se primenjuju kod samonosećih struktura omogućavaju ravnomernu raspodelu opterećenja po celoj površini, bez koncentracije u određenim tačkama. Odlikuju se velikom čvrstoćom, a često su lagane konstrukcije.

Samonoseće konstrukcije nalaze primenu u arhitekturi, građevini, mašinstvu, kao i drugim inženjerskim disciplinama. Tipični primeri ovakvih struktura u arhitektonskoj i inženjerskoj aplikaciji jesu kupole hramova, stadioni, mostovi i slično. Ovakvi oblici često se koriste za potrebe pokrivanja velikih površina, poput arhitektonskih paviljona, hala, sportskih dvorana i hangara, s obzirom da obezbeđuju efekat slobodnog, prostranijeg i otvorenijeg prostora.

1.1. Podela samonosećih struktura

Tipične geometrije samonosećih struktura mogu se podeliti u četiri kategorije:

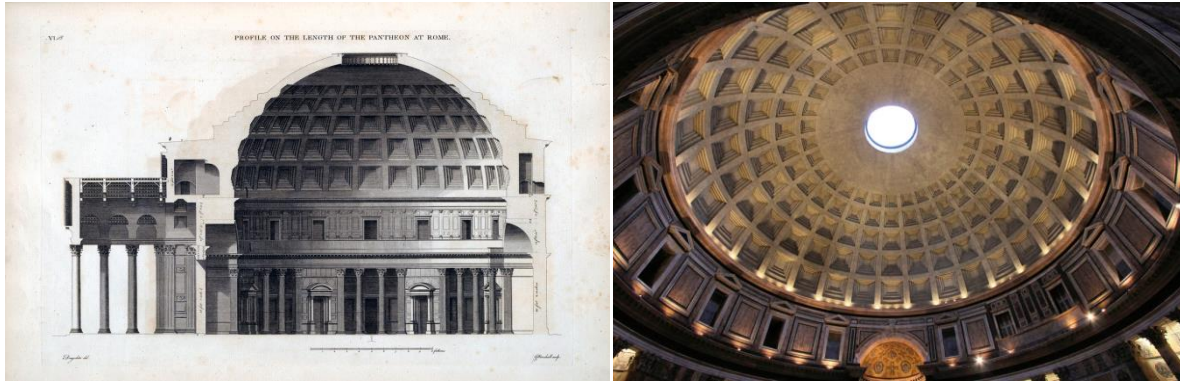
1) Kupole

Postoje razni oblici kupola. Odličan primer kupole kao samonoseće konstrukcije predstavlja kupola *Santa Maria del Fiore* u Firenci (slika 1.1). Delo je arhitekta Filippo Brunelleskija. Izgrađena je u 15. veku i najveća je zidana kupola na svetu. Revolucionarna je jer je izgrađena bez drvene skele – bez potpore. Pre Brunelleskijeve kupole bilo je tipično korišćenje privremene potpore sa spoljašnje strane prilikom izgradnje kupola.



Slika 1.1 – *Santa Maria del Fiore*

Među poznatijima je i rimska rotunda Panteon (slika 1.2) koja se nalazi u Rimu i predstavlja najveću nearmiranu betonsku kupolu na svetu.



Slika 1.2 – Panteon u Rimu

2) *Strukture bazirane na principu lančane krive*

Lančava kriva (*catenary curve*, engl.) se može opisati kao oblik koji lanac prirodno zauzima kada visi fiksiran u dve krajnje tačke i slobodno pada pod silom gravitacije. Lančana kriva je grafik hiperboličke kosinusne funkcije [1]. U arhitekturi se obično koristi obrnuta lančana kriva – tip luka koji se koristi za ulaze, prolaze, ili samostalne građevine, poput *Gateway Arch* u Vašingtonu (slika 1.3) visokog 192 metra, ističući se gabaritima u odnosu na okolne zgrade.



Slika 1.3 – *Gateway Arch*

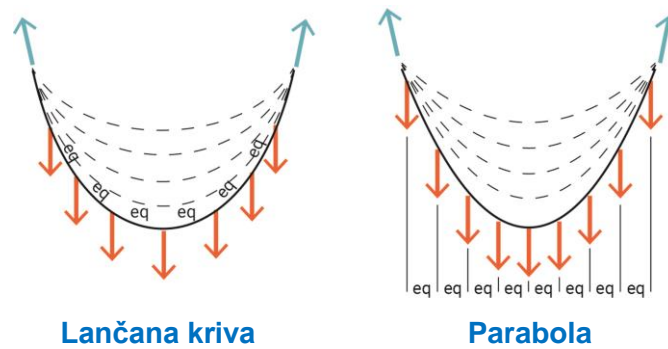
Kod španskog arhitekta Feliksa Kandelega primećuje se izrazita inspiracija obrnutom lančanom krivom. Većina njegovih dela podrazumeva primenu ovakvih elemenata u konstrukciji (slika 1.4).



Slika 1.4 – Lančane krive u konstrukcijama Feliksa Kandelega

Lančani lukovi su jaki jer preusmeravaju vertikalnu silu gravitacije u silu kompresije, koja vrši pritisak duž krivine luka [2]. Elementi luka, tj. „čelije“ same konstrukcije, su na ovaj način opterećene pritisnom silom koja je rezultat samo sopstvene težine luka.

Prednosti ovakvog tipa luka u odnosu na parabolu jeste ravnomerna raspodela opterećenja, bez koncentracije u određenim tačkama (slika 1.5).



Slika 1.5 – Razlika između lančane krive i parabole

3) Ljuske

Ljuske su zakrivljene površine tankih zidova. Postoji više tipova ove strukture, ali u većini slučajeva one sadrže neke ponavljajuće elemente. Ponavljajući elementi mogu biti različitih oblika i geometrija. Ljuske mogu biti u vidu membrana, lančanih kriva, geodetskih kupola, *Voronoi* struktura, rešetkastih struktura i takozvanih *tensegrity* struktura. Ljuske nalik membranama imaju ćelije koje mogu biti različitih oblika i dimenzija, a često su heksagonalnog oblika, nalik pčelinjem saću (slika 1.6).



Slika 1.6 – Ljuska u vidu membrane

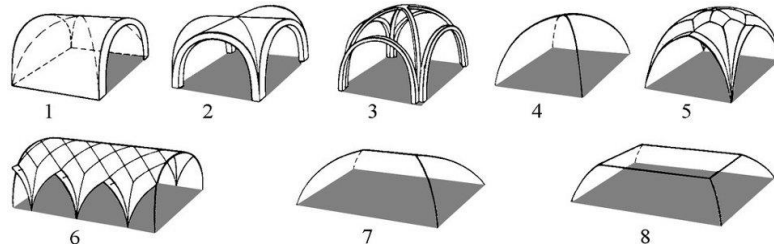
Struktura geodetskih kupola može biti manje ili više kompleksna, ali tipično sadrži trougaone ponavljajuće elemente u osnovi (slika 1.7).



Slika 1.7 – Geodetske kupole sa trougaonim elementima

4) Svodovi

Svod je konstruktivni element koji pokriva prostor zaobljenim lučnim ili sfernim površinama i oslanja se na okolne zidove ili stubove. Svodovi mogu biti različitih oblika, među kojima se ističu bačvasti, krstasti i rebrasti oblici. Različite vrste svodova prikazane su na slici 1.8.

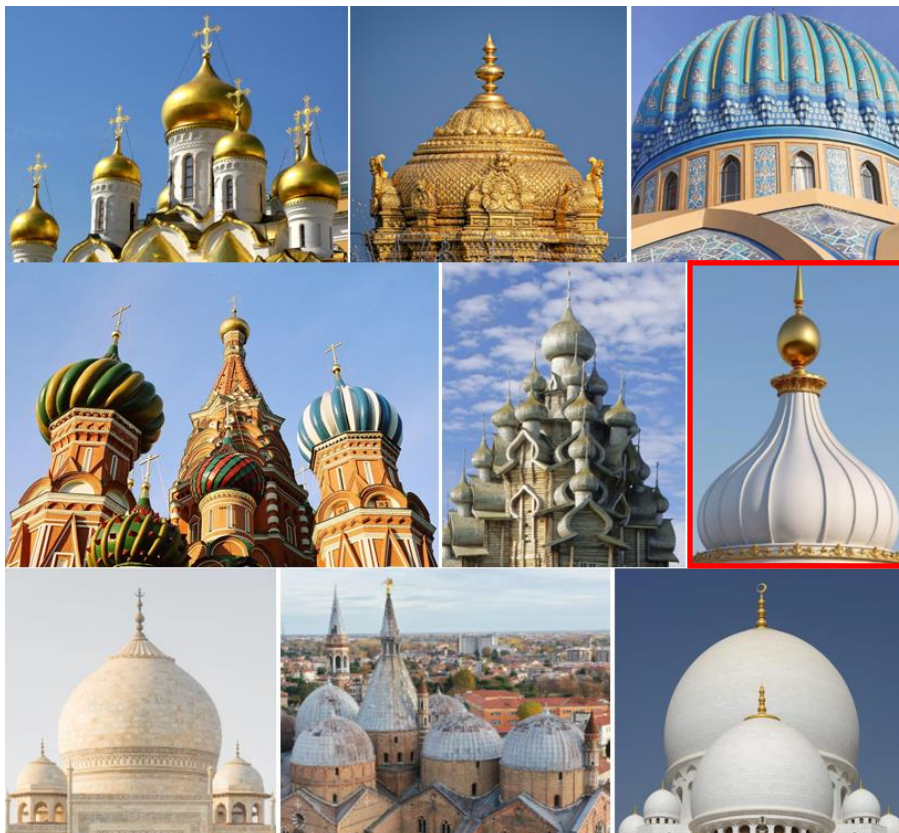


Slika 1.8 – Različiti oblici svodova

Često se primenjuje kombinacija više gorenavedenih kategorija samonosećih struktura.

1.2. Predmet projektnog zadatka – kupola

Kupola predstavlja samonoseću konstrukciju sfernog oblika postavljenu iznad građevina koje u osnovi mogu imati kružnicu, kvadrat, pravougaonik ili višougao [3]. Geometrije i oblici kupola mogu biti veoma raznovrsni, u zavisnosti od njihove primene (slika 1.9).



Slika 1.9 – Različiti oblici kupola

Kao inspiracija za izradu kupole u ovom projektnom zadatku izabrana je kupola oblika nalik glavici belog luka, na prethodnoj slici označena crvenim okvirom.

1.3. Mikro obrada

Mikro obrada predstavlja obradu malih delova čiji su primitivi ili bar jedna od dimenzija reda veličine mikrometra ($1 \div 999 \mu\text{m}$) [4]. Kod mikro obrade veliki uticajni faktor na kvalitet izrađenog dela imaju geometrija alata, dostupnost alata i tehnologije, veličina i orijentacija zrna materijala itd.

Tehnologija mikro obrade može se podeliti na procese uklanjanja materijala, procese dodavanja materijala po slojevima, plastično oblikovanje materijala i kombinovane procese.

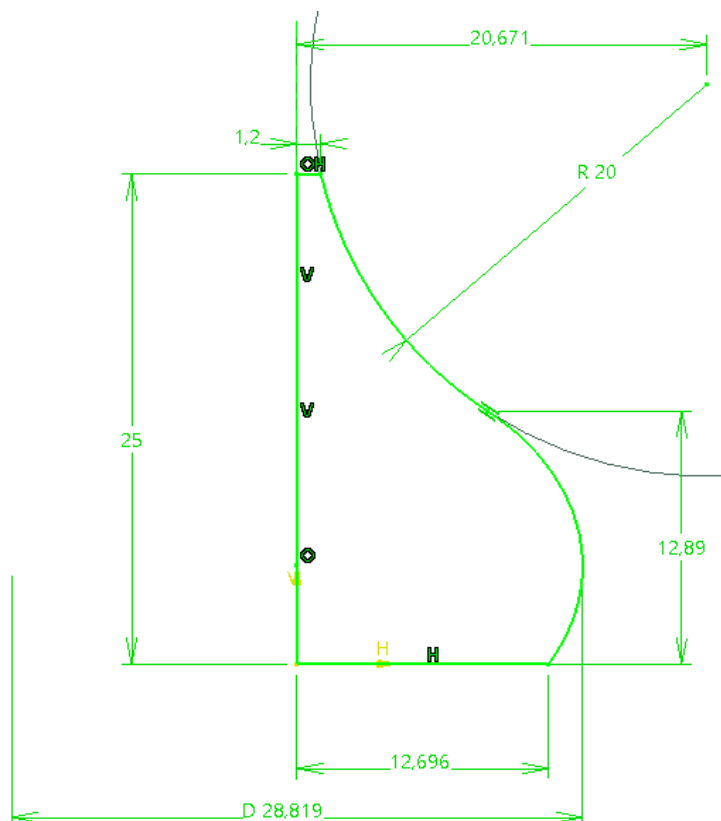
Izrada kupole, koja predstavlja predmet projektnog zadatka, svrstava se u mikro obradu, s obzirom na to da sadrži elemente geometrije dimenzija u mikronskom području. Za njenu izradu primenjena je SLA tehnologija aditivne proizvodnje, koja pripada procesima dodavanja materijala. Tačnost izrade analizirana je primenom digitalnog mikroskopa.

2. PROJEKTOVANJE KUPOLE

U okviru ovog dela projekta izvršeno je trodimenzionalno modeliranje kupole tipa 'onion dome'. Modeliranje je realizovano u CAD (engl. *Computer Aided Design*) softverskom paketu CATIA, koji omogućava precizno definisanje geometrije, jednostavnu kontrolu dimenzija, kao i efikasno prilagođavanje modela tokom procesa projektovanja.

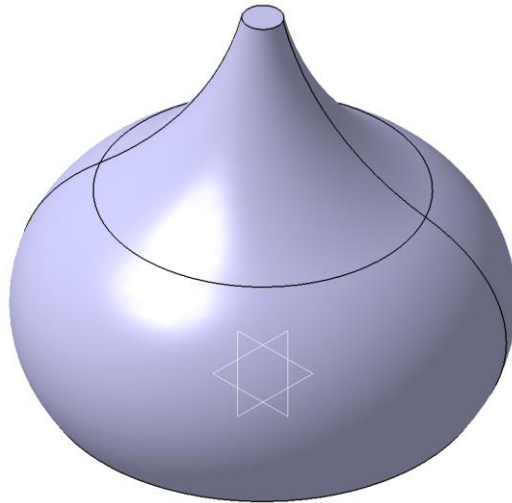
Primena CAD sistema značajno ubrzava proces dizajniranja, analize i eventualnog redizajniranja modela, čime se obezbeđuje visok nivo tačnosti i konzistentnosti geometrije.

Kupola tipa 'onion dome' odlikuje se karakterističnim oblikom sa promenljivim prečnikom po visini, sa izraženim proširenjem u srednjem delu i suženjem ka vrhu. što zahteva pažljivo definisanje uzdužnog preseka i odgovarajućih krivina. Zbog takve geometrije, proces modeliranja zahteva pažljivo definisanje uzdužnog preseka i odgovarajućih krivina. Postupak modeliranja započet je formiranjem dvodimenzionalne skice profila kupole (slika 2.1) u odgovarajućoj radnoj ravni. Prilikom izrade skice korišćene su krive linije koje omogućavaju glatke prelaze između pojedinih segmenata profila, dok su geometrijska ograničenja primenjena radi obezbeđivanja simetrije i pravilnog oblika kupole.



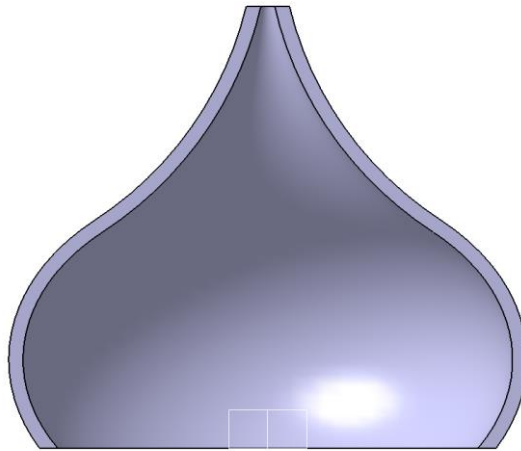
Slika 2.1 – Skica profila kupole

Nakon završetka dvodimenzionalne skice, sledeći korak u procesu modeliranja bio je formiranje trodimenzionalnog tela primenom komande *Revolve* (slika 2.2). Skica profila kupole rotirana je oko vertikalne ose za ugao od 360° , čime je dobijen osnovni zapreminski model kupole sa potpunom osnom simetrijom. Ovim postupkom definisana je osnovna forma kupole, koja predstavlja polaznu geometriju za dalje modeliranje.



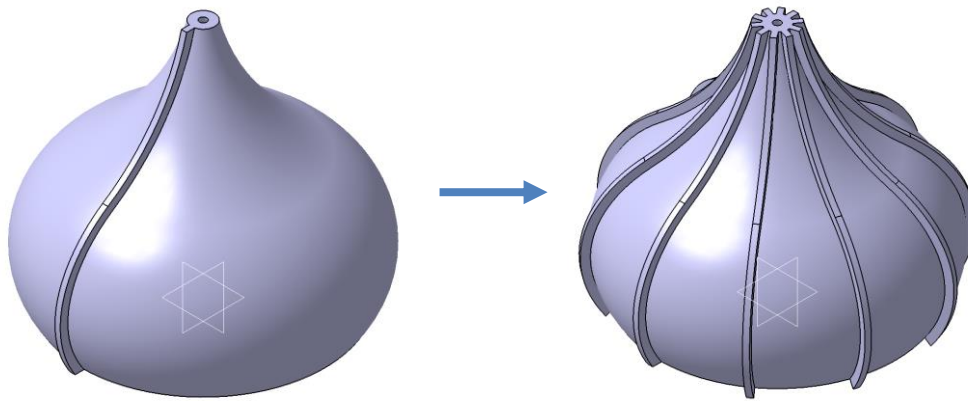
Slika 2.2 – Funkcija *Revolve*

Kako bi se dobila realističnija konstrukcija kupole, u narednom koraku primenjena je komanda *Shell*. Ovom operacijom izvršeno je izdubljivanje unutrašnjosti modela, pri čemu je definisana konstantna debljina zida od 0.8 mm. Na taj način model je pretvoren iz punog tela u šuplju strukturu, čime je približen stvarnim konstrukcionim rešenjima i istovremeno smanjena ukupna masa modela (slika 2.3).



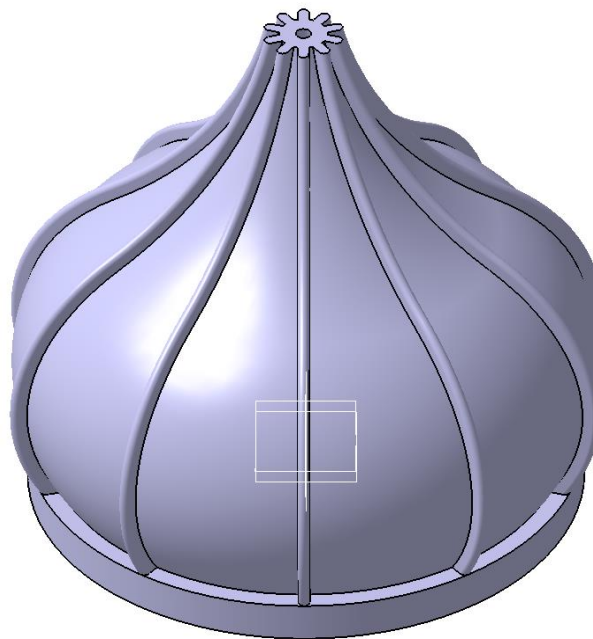
Slika 2.3 – Komanda *Shell*

Nakon formiranja osnovne šuplje geometrije, pristupljeno je modeliranju ojačanja u vidu rebara. Najpre je definisano jedno rebro na površini kupole, koje je postavljeno u odgovarajući položaj u odnosu na osu simetrije. Zatim je primenom komande *CircularPattern* izvršeno kružno umnožavanje tog rebra, pri čemu je rebro kopirano ukupno devet puta oko centralne ose kupole. Na taj način formirana je ravnomerno raspoređena rebrasta struktura preko cele površine kupole, koja doprinosi povećanju krutosti konstrukcije i dodatno naglašava vizuelni identitet modela (slika 2.4).



Slika 2.4 – Formiranje rebra i komanda *Circular Pattern*

U završnoj fazi modeliranja dodati su kozmetički i konstruktivni detalji, poput zaobljenja ivica, kako bi se uklonile oštre ivice i poboljšao izgled modela, kao i postolja kupole koje omogućava stabilno pozicioniranje modela. Dodavanjem ovih elemenata proces modeliranja je završen, a dobijeni model predstavlja kompletan i funkcionalan 3D prikaz kupole tipa *onion dome*, spreman za dalju analizu, vizuelizaciju i pripremu za 3D štampu (slika 2.5).



Slika 2.5 – Finalni izgled kupole

3. IZRADA KUPOLE

Kao što je navedeno, kupola je proizvedena aditivnim tehnologijama. Aditivna proizvodnja je proces kreiranja fizičkih objekata dodavanjem materijala sloj po sloj na osnovu 3D modela iz određenog softverskog paketa. Tip podatka koji se koristi za aditivnu proizvodnju je STL format. Prilikom čuvanja modela u STL formatu vrši se triangulacija površina.

Aditivna proizvodnja nudi niz prednosti i danas je gotovo nezaobilazan korak u proizvodnji. U zavisnosti od primene, razlikujemo tri kategorije aditivne proizvodnje [5]:

- brza izrada prototipova (*Rapid Prototyping*) – koristi se za izradu modela i prototipova finalnog proizvoda oponašajući njegov oblik, geometriju i funkcionalnost. Na ovaj način omogućava se ispitivanje proizvoda i uviđanje eventualnih grešaka pre puštanja modela u proizvodnju, čime se obezbeđuju značajne uštede novca i vremena;
- brza izrada alata i kalupa (*Rapid Tooling*) – primenjuje se za izradu alata i kalupa ili njihovih najkompleksnijih delova za proizvodnju prototipnih ili probnih serija proizvoda;
- brza proizvodnja (*Rapid Manufacturing*) – podrazumeva primenu aditivnih tehnologija za izradu proizvoda koji će se primenjivati kao i proizvod izrađen u serijskoj proizvodnji. Na ovaj način 3D štampom dobija se finalni proizvod.

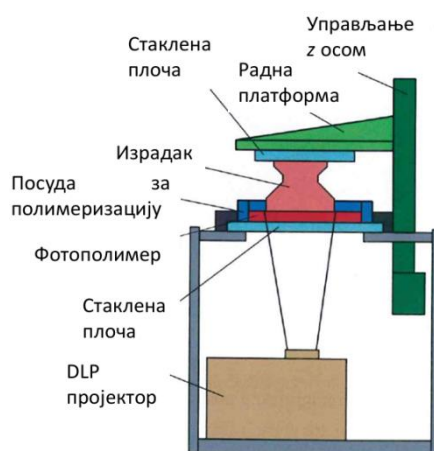
Aditivne tehnologije možemo podeliti i u zavisnosti od kategorije procesa, prema standardu ASTM F2792-12a [6]:

- Fotopolimerizacija materijala u kadi (*Vat photopolymerization*, engl.) – proces u kome se polimerizacijom izvodi selektivno očvršćavanje tečnog fotopolimera. Široko poznat pod nazivom stereolitografija (*Stereolithography* – SLA, engl.);
- Brizganje materijala/Direktna 3D štampa (*Material jetting*, engl.) – proces u kome se kapljice materijala selektivno talože;
- Vezivna 3D štampa (*Binder jetting*, engl.) – proces u kome se na materijal u vidu praha selektivno nanosi tečno vezivno sredstvo;
- Spajanje praškastog materijala (*Powder bed fusion*, engl.) – proces u kome dolazi do fuzije materijala u vidu praha pod uticajem toplotne energije. Poznato i pod nazivom selektivno lasersko sinterovanje (*Selective laser sintering* – SLS, engl.);
- Ekstrudiranje materijala (*Material extrusion*, engl.) – proces u kome se rastopljeni materijal selektivno nanosi na podlogu ili prethodni sloj kroz mlaznicu. Poznata tehnologija je FDM (*Fused deposition modeling*, engl.);
- Deponovanje primenom usmerene energije (*Directed energy deposition*, engl.) – proces u kome se pomoću fokusirane toplotne energije izvršava topljenje i stapanje materijala koji se dozira;
- Laminiranje listova materijala (*Sheet lamination*, engl.) – proces u kome se listovi materijala kroje po definisanoj konturi i spajaju u cilju formiranja objekta.

3.1. Fotopolimerizacija u kadi – Vat photopolymerization

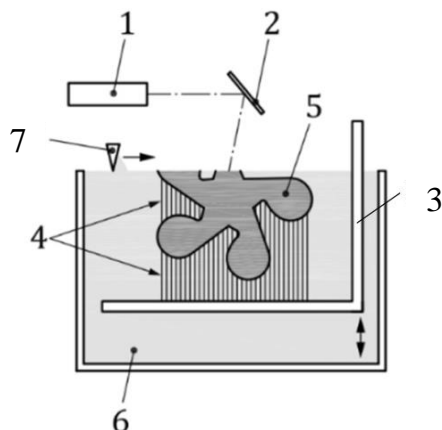
Za izradu kupole izabran je postupak fotopolimerizacije u kadi, s obzirom na to da ova metoda omogućava izuzetnu preciznost, koja je neophodna za adekvatno formiranje mikronskih primitiva. Postoji više metoda fotopolimerizacije u kadi, u zavisnosti od primenjenog izvora svetlosti pomoću koga se vrši postupak očvršćavanja sloja fotopolimera. To su:

- 1) **DLP metoda** (*Direct Light Processing*, engl.) – očvršćavanje fotopolimera se ostvaruje pomoću DLP projektor, koji projektuje UV svetlost na radnu površinu. Ova metoda podrazumeva primenu fotomaske koja se formira unutar projektor, kreira sliku trenutnog sloja koji je potrebno očvrstiti i selektivno propušta UV zračenje u skladu sa slikom. Očvršćavanje čitavog sloja odvija se simultano [7]. Radna ploča, za koju se vezuje inicijalni sloj, nalazi se u obrnutom položaju i kreće se po z osi. Uprošćena šema DLP metode prikazana je na slici 3.1.



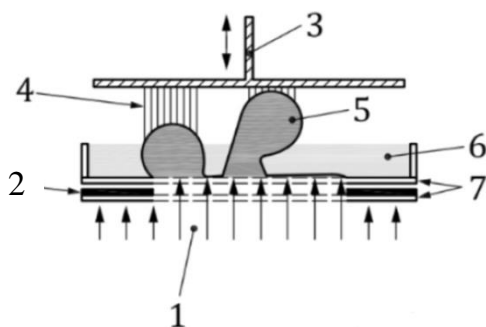
Slika 3.1 – Šema DLP metode

- 2) **SLA metoda** (*Stereolithography*, engl.) – očvršćavanje fotopolimera vrši se UV laserom. Ne koristi se maska, već laser tačkasto skenira površinu smole i očvršćava je, kreirajući oblik sloja. S obzirom da se sloj ne kreira odjednom, već tačku po tačku, ova metoda je znatno sporija. Radna ploča se pomera po z osi. Uprošćena šema SLA metode prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2 – Šema SLA metode

- 3) **mSLA metoda** (*Masked Stereolithography*, engl.) – očvršćavanje fotopolimera se vrši pomoću UV LED izvora svetlosti. Maska je u vidu monohromatskog LCD ekrana, koji kreira sliku trenutnog sloja i selektivno propušta UV zračenje. Ceo sloj očvršćava simultano. Kao i kod DLP metode, platforma za koju se vezuju slojevi nalazi se u obrnutom položaju i kreće se po z osi. U suštini, DLP i mSLA metode imaju isti princip funkcionisanja. Glavna razlika ogleda se u izvoru UV svetlosti za očvršćavanje sloja. Uprošćena šema mSLA metode prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3 – Šema mSLA metode

3.2. Varijacije kupole

Radi analize samonoseće konstrukcije, uz osnovni model kupole štampano je još nekoliko modela sa određenim varijacijama. Modeli su prikazani u tabeli 3.1.

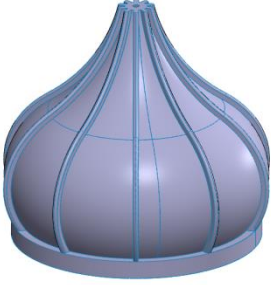
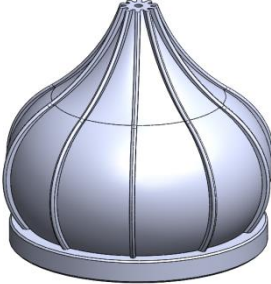
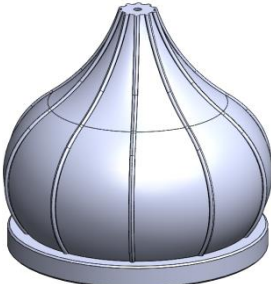
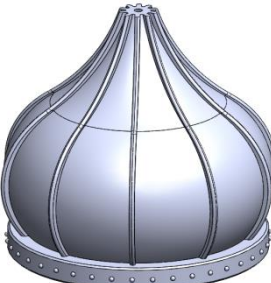
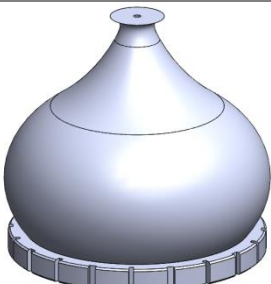
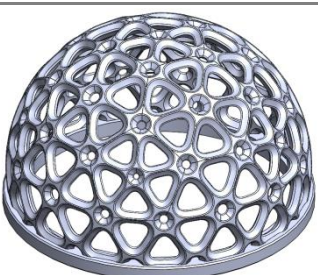
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Tabela 3.1 – Izgled variranih kupola

Varijacije modela odrađene su u softverskom paketu *SOLIDWORKS* (slika 3.4).



Slika 3.4 – Logo odabranog softverskog paketa

Brojem 1 označen je originalni model. Prva dva modela razlikuju se po radijusima od kojih je kupola sačinjena. Takođe, ploča u osnovi kupole je kod drugog modela proširena i dodate su oborene ivice funkcijom *Chamfer*. Debljina zida oba modela iznosi 0,8 mm.

Kod trećeg modela odrađena je varijacija u debljini zida u odnosu na drugi model. Debljina zida povećana je na 1,2 mm. Samim tim se promenila geometrija na vrhu kupole – rebra kupole su manje izražena i smanjen je otvor za curenje rezina tokom štampe sa $\varnothing 0,91$ mm na $\varnothing 0,884$ mm.

Četvrti model je identičan kao drugi, s tim što su dodati ukrasni sferni elementi na bočnoj strani prstena u osnovi prečnika $\varnothing 0,5$ mm i visine 0,3 mm.

Peti model je varijacija modela označenog brojem 2. Vrh kupole je izvučen i izvršeno je naglo proširenje prečnika radi provere uspešnosti procesa štampe. Frontalna projekcija modela prikazana je na slici 3.5. Otvor na vrhu za curenje fluida tokom štampe iznosi tačno $\varnothing 0,8$ mm, radi preciznog merenja i provere tačnosti dimenzija. Takođe, dodati su ukrasni elementi u vidu žljebova po rubu prstena u osnovi kupole. Žljebovi su visine samog prstena, ali je varirana širina žljeba. Širina žljeba se naizmenično menja sa 0,5 mm na 0,8 mm.



Slika 3.5 – Bočni pogled na geometriju petog modela

Za šesti model kupole odabran je potpuno drugačiji deo. Inspirisan je geodetskim strukturama, u osnovi ima kružnice i trougaone elemente projektovane na polusferu. U donjem delu dodat je prsten u osnovi kupole.

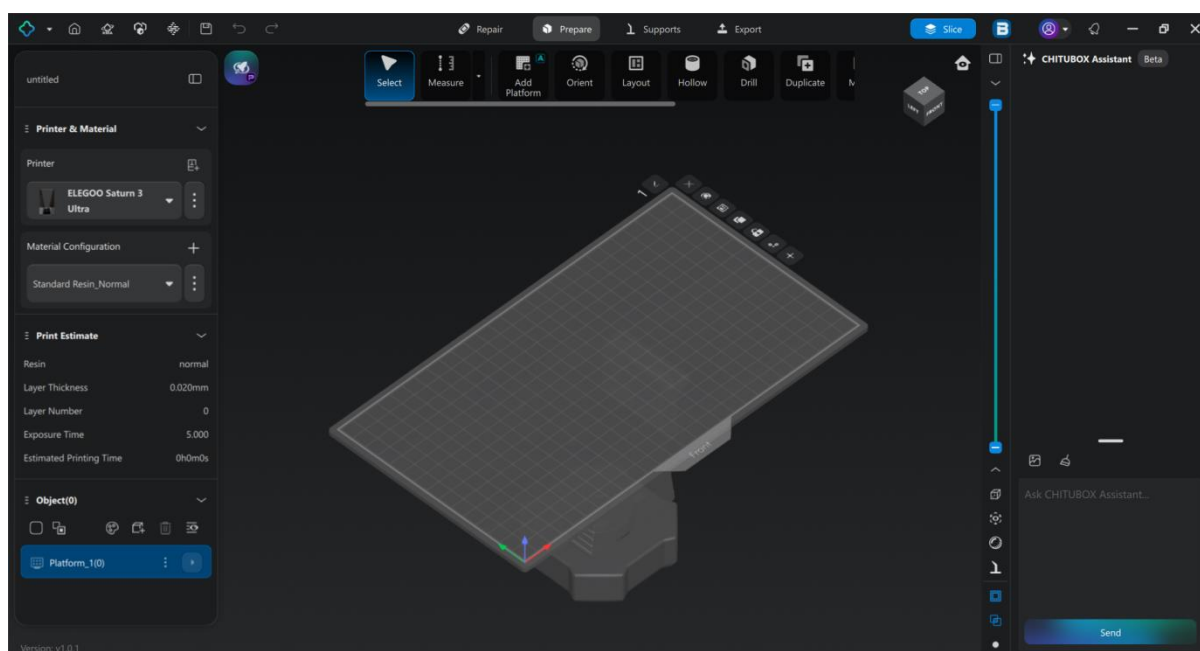
3.3. Priprema za štampu

3D modele kupola potrebno je uvesti u odgovarajući softver za pripremu modela za štampu i podešavanja parametara štampe. Za te potrebe odabran je softver *Chitubox* (slika 3.6). Modeli se uvode u STL formatu.



Slika 3.6 – Logo odabranog softvera za pripremu štampe

Proces pripreme za štampu sastoji se iz nekoliko koraka. Prvo je potrebno definisati model 3D štampača koji će biti korišćen za izradu delova, kao i materijal koji će biti primenjen, nakon čega se može preći u fazu pripreme samih modela. Izgled radnog okruženja softvera *Chitubox* prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7 – Radno okruženje slajsera *Chitubox*

U ovom slučaju, 3D štampač korišćen za izradu kupola je proizvođača *ELEGOO*, model *Saturn 3 Ultra* (slika 3.8). Ovaj štampač spada u štampače *mSLA* tehnologije. Specifikacije štampača prikazane su u tabeli 3.2.



Slika 3.8 – ELEGOO Saturn 3 Ultra

Dimenzije 3D štampača	305.9 × 273 × 562.5 mm
Dimenzije radnog prostora	218.88 × 122.88 × 260 mm
Maksimalna brzina štampe	150 mm/h
Visina sloja	0.01 ÷ 0.2 mm
Preciznost Z ose	0.01 mm
Preciznost u XY ravni	19 × 24 μm
Težina	12 kg
Način povezivanja	Wi-Fi, USB
Kompatibilni slajseri	Chitubox, Voxeldance Tango, Autodesk Fusion

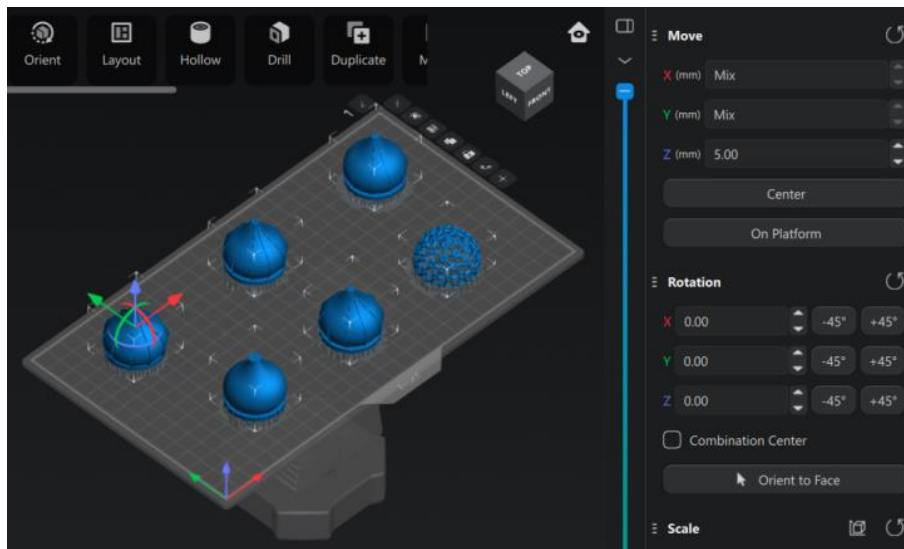
Tabela 3.2 – Specifikacije 3D štampača *Elegoo Saturn 3 Ultra*

Nakon definisanja štampača potrebno je definisati materijal. Odabrani materijal za izradu kupola jeste *10K Standard Plus Resin* proizvođača *JAMG HE* u crnoj boji (slika 3.9).



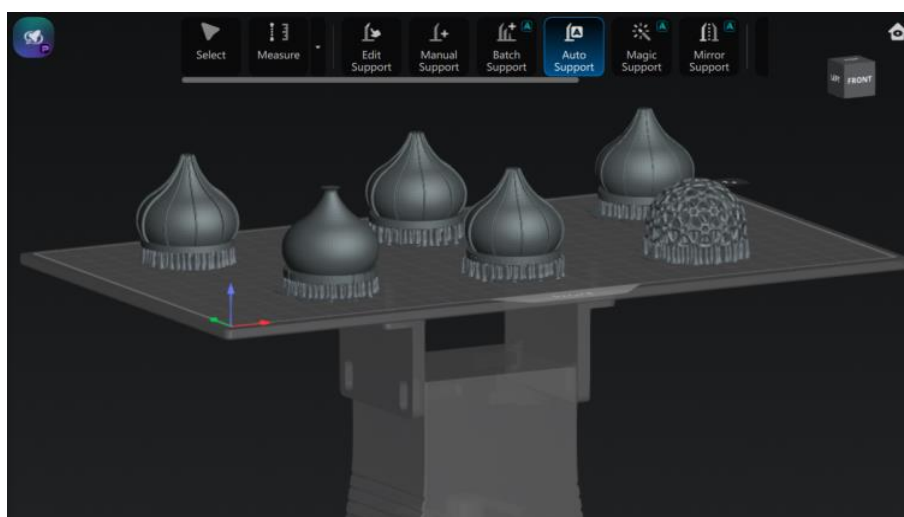
Slika 3.9 – JAMG HE Standard Plus Resin 10K Black

Sledeći korak predstavlja učitavanje modela i njihovo pravilno orijentisanje. Svih šest modela postavljeno je na radnu ploču. S obzirom na to da je fokus projekta na analizi samonosećih konstrukcija, modeli nisu rotirani u odnosu na ravan ploče, već su postavljeni paralelno na nju. Modeli su odignuti 5 mm u odnosu na podlogu, gde će biti postavljena potpora, kako ne bi došlo do lepljenja i otežanog skidanja površina kupola sa radne ploče. Na slici 3.10 prikazane su komande koje definišu orijentaciju i poziciju delova. Može se uočiti komanda *Move*, gde su po Z osi delovi odignuti za 5 mm. Otvori na vrhu kupola služe za curenje rezina tokom štampe, kako bi se osigurao pravilan tok rezina i izbeglo zaglavljanje rezina unutar kupole.



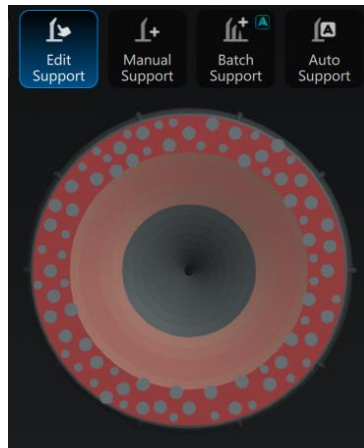
Slika 3.10 – Pozicioniranje delova u random okruženju

Sledeći korak je generisanje potpore. Odabirom oblika kupole za izradu 3D štampom se smanjuje gustina potrebne potpore, jer je sloj koji se izrađuje prirodno podržan prethodno izrađenim slojevima, te nema potrebe dodavati potporu unutar kupole, čime se ispunjava uslov samonoseće konstrukcije.



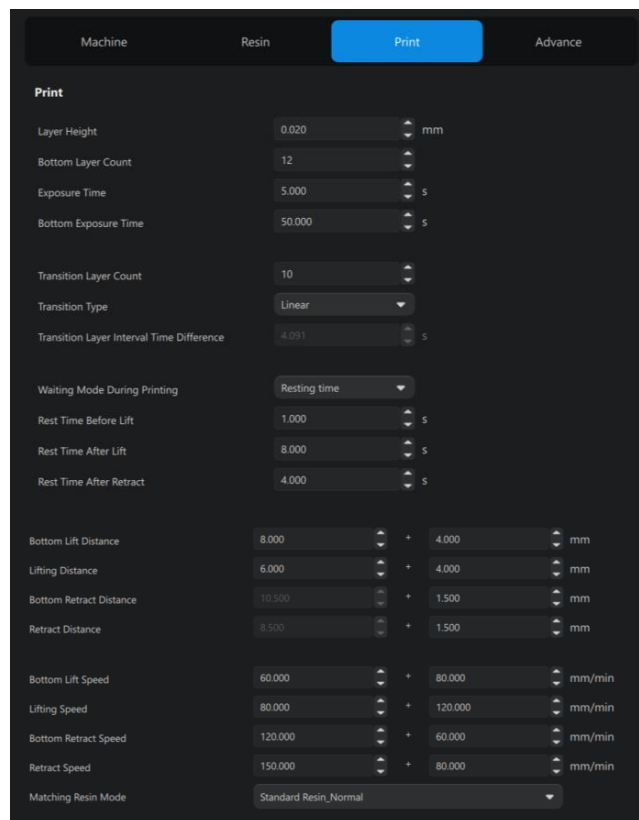
Slika 3.11 – Generisanje potpore

Potpore je prvobitno generisana automatski komandom *Auto Support* (slika 3.11). Ova komanda generiše potporu na svim površinama, pa je bilo potrebno komandom *Edit Support* obrisati potporu sa svih unutrašnjih površina kupole, kao i promeniti veličinu automatski generisane potpore na određenim mestima. Komandom *Manual Support* je dodata potpora manjih dimenzija na mestima na kojima je uočena potreba za njom. Izgled modifikovane potpore na jednom od kupola prikazan je na slici 3.12.



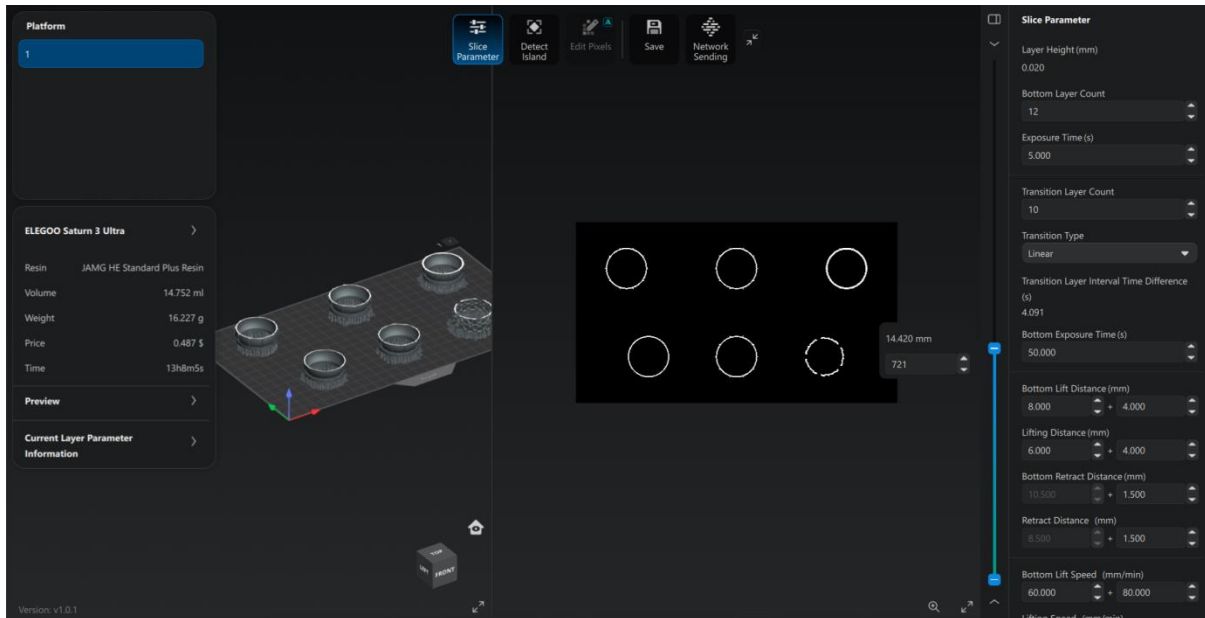
Slika 3.12 – Izgled gotove potpore sa donje strane kupole

Nakon generisanja potpore potrebno je podesiti parametre štampe. Parametri štampe su podešeni na osnovu preporuka proizvođača za izabrani materijal [8] i iskustva. Parametri štampe prikazani su na slici 3.13.



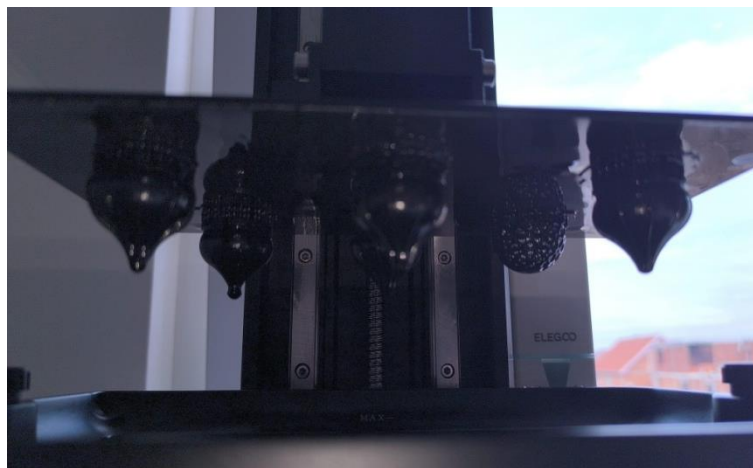
Slika 3.13 – Parametri štampe

Poslednji korak je sečenje modela komandom *Slice* prema definisanim parametrima štampe. Ovaj korak omogućava prikaz pojedinačnih slojeva (slika 3.14), kao i prikaz informacija o potrebnoj količini materijala u mililitrima, težini delova u gramima i potrebnom vremenu izrade. U našem slučaju, potrebno vreme izrade iznosi 13h8m5s, što je opravdano s obzirom na to da se radi o samonosećoj strukturi veoma tankih zidova. Duže vreme štampe osigurava adekvatno ceđenje, a podešenim parametrima izbegavamo nagle pokrete radne ploče, što doprinosi pravilnoj izradi modela.



Slika 3.14 – Komanda *Slice*

Ovime je završen postupak pripreme modela za štampu. Fajl se čuva u formatu .ctb i prebacuje na eksternu memoriju radi prenosa podataka na štampač, čime može da se započne proces štampe. Izgled modela nakon završetka štampe prikazan je na slici 3.15.



Slika 3.15 – Izgled modela nakon završetka štampe

3.4. Postprocesiranje

Nakon skidanja izrađenih modela sa radne platforme štampača potrebno je izvršiti postprocesiranje, koje se sastoji od pranja delova u izopropil alkoholu, čime se uklanja višak rezina, zatim skidanja potpore i naknadnog očvršćavanja izlaganjem UV svetlu. Čišćenje i dodatno očvršćavanje izvršeni su korišćenjem mašine *Anycubic Wash & Cure 3* (slika 3.16).

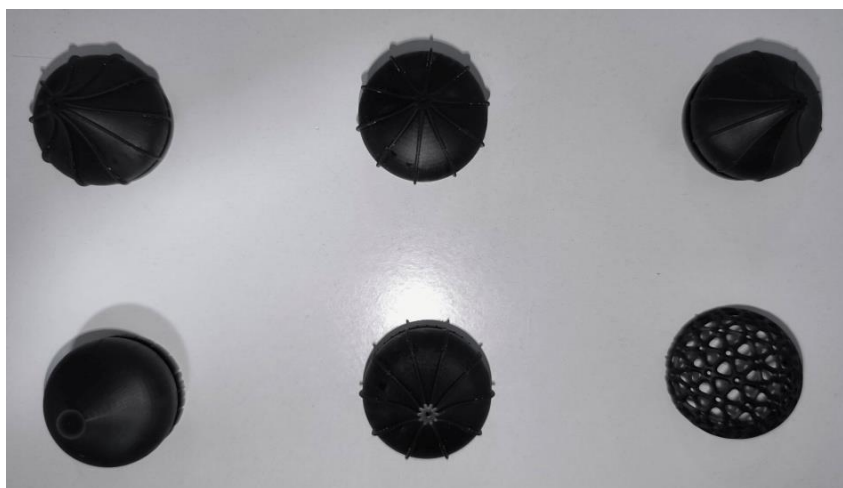


Slika 3.16 – *Anycubic Wash & Cure 3*

Poslednji korak postprocesiranja jeste šmirglanje delova, ukoliko je ono potrebno. U našem slučaju izvršeno je šmirglanje površina modela na kojima se nalazila potpora, iz estetskih razloga.

3.5. Rezultati štampe

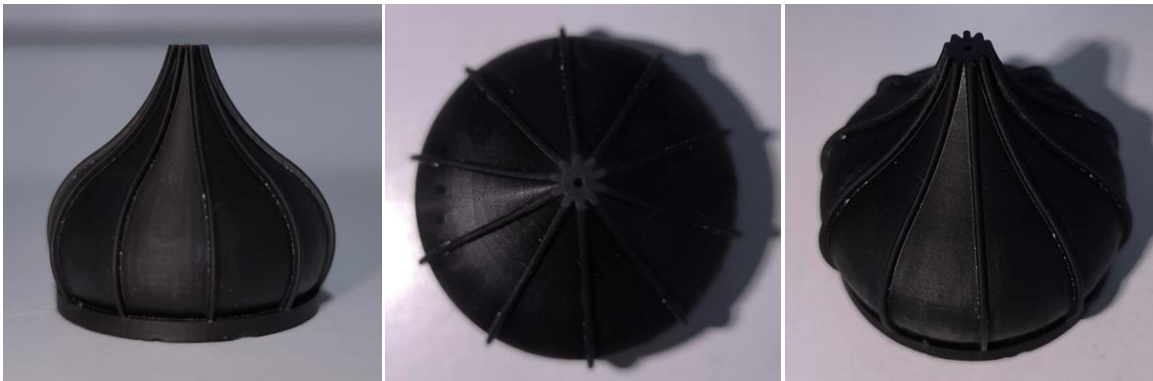
Gotovi delovi prikazani su na slici 3.17.



Slika 3.17 – Gotovi delovi

Izgled originalnog modela kupole nakon završetka postprocesiranja prikazan je na slici 3.18. Može se zaključiti da je štampa uspešla. Kupole su uspešno izrađene bez unutrašnje potpore. Primećene su nesavršenosti na pojedinim modelima u vidu naprslina na mestima skidanja potpore, što

je razumljivo s obzirom na male gabaritne mere modela. Preporuka za otklanjanje ovakvog tipa problema bi bila primena manje debljine potpore i uklanjanje potpornih stubova sa ruba modela, gde postoji veća opasnost od oštećenja.



Slika 3.18 – Finalni izgled originalnog modela kupole

3.6. Simulacija

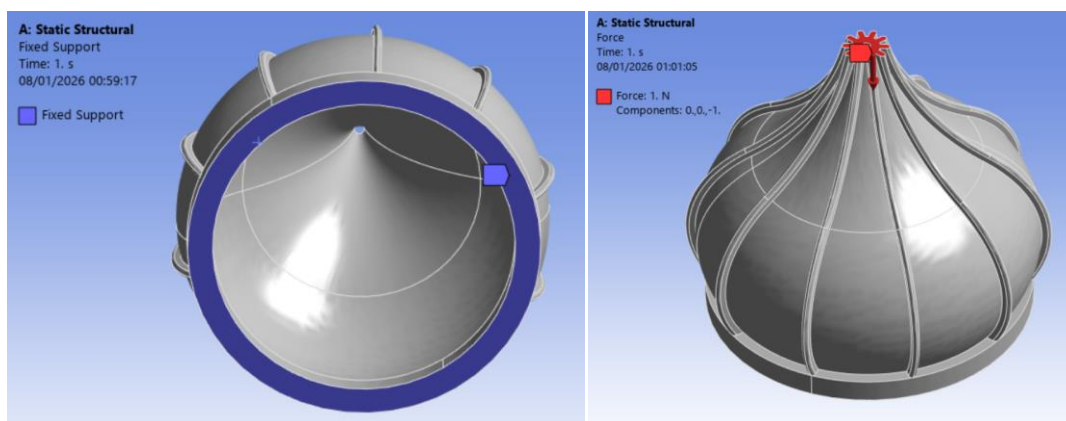
Odrađena je simulacija kako bi se ispitalo ponašanje kupole pod opterećenjem. Simulacija je izvršena korišćenjem softverskog paketa ANSYS (slika 3.19).



Slika 3.19 – Softverski paket ANSYS

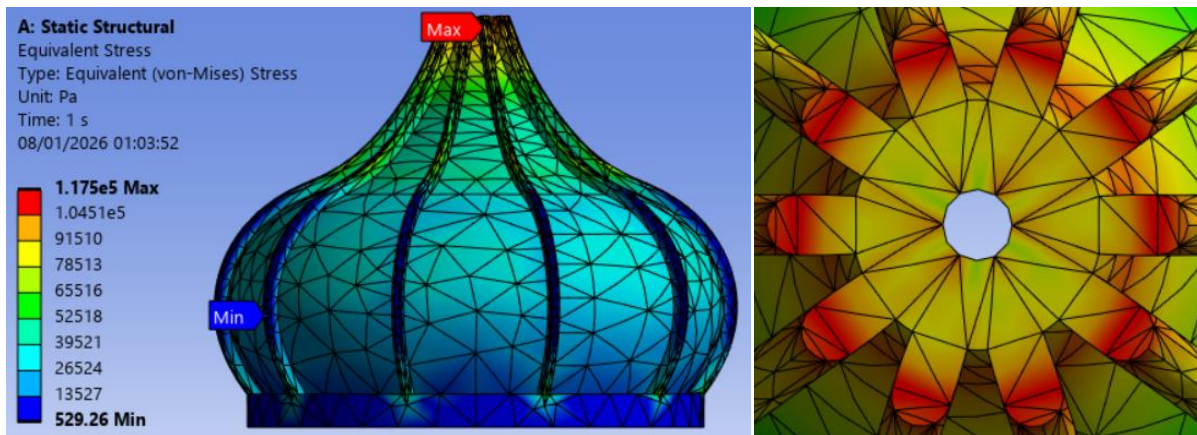
Uslovi ispitivanja (slika 3.20):

- donja površina modela je fiksirana;
- gornja površina modela je opterećena silom kompresije intenziteta 1 N.



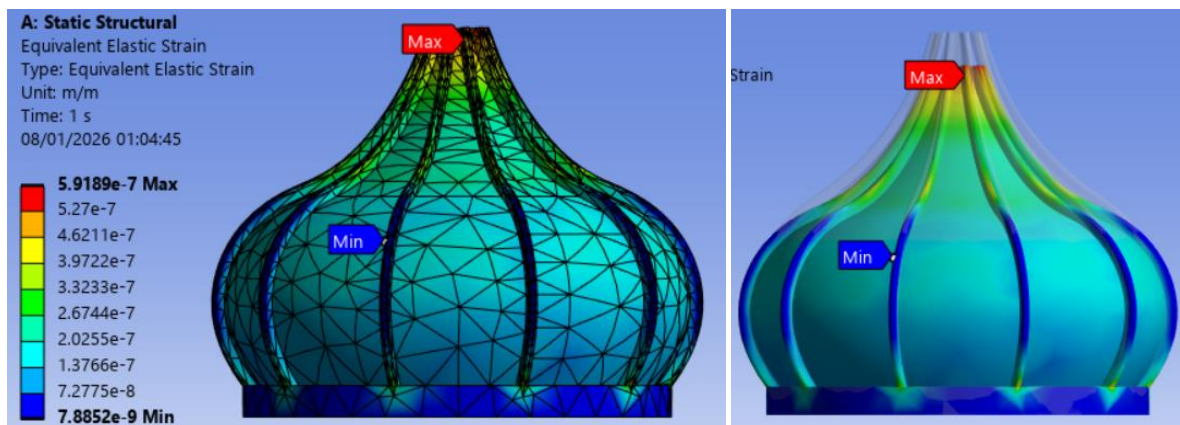
Slika 3.20 – Zadati uslovi simulacije

Analiza obuhvata ekvivalentni napon σ [Pa] i ekvivalentnu deformaciju ϵ [%]. Rezultati analize prikazani su u nastavku. Na slici 3.21 vidi se raspodela napona na opterećenom modelu sa označenim mestima maksimalnog i minimalnog napona. Primećuje se da je najveći napon u predelu gornje površine na koju sila deluje, i to na vrhovima bočnih rebara, koja prate konturu kupole.



Slika 3.21 – Ekvivalentni napon

Na slici 3.22 prikazan je rezultat analize ekvivalentne deformacije. Označena su mesta maksimalne i minimalne deformacije, a sa desne strane slike može se videti obris neopterećene kupole, radi poređenja.



Slika 3.22 – Ekvivalentna deformacija

4. MERENJE

Merenje i kontrola su od velikog značaja u mašinskoj industriji. Metrologija kao nauka o merenju i karakterizaciji materijala, predstavlja zasebnu oblast u proizvodnji koja dovodi do razvoja i unapređivanja mašinskih delova.

Merenje predstavlja određivanje fizičke veličine ili mere objekta upoređivanjem sa etalom. U oblasti mikro sveta, merenje je zahtevnije u odnosu na makro svet. Poteškoće koje se javljaju jeste ograničen radni prostor, otežano pozicioniranje i stezanje delova i slično. Takođe, tačnost i rezolucija moraju biti mnogo veće u odnosu na

Postoji više metoda merenja u mikro oblasti od kojih su neke:

- Kontaktne metode,
- Beskontaktne metode,
- Optička mikroskopija,
- Konfokalna mikroskopija,
- Skenirajuća elektronska mikroskopija,
- Mikroskopija atomskim silama itd.

4.1. Mikroskop

Za potrebe merenja jedan od adekvatnih instrumenata za korišćenje jeste mikroskop. Mikroskop je optički uređaj koji se koristi za posmatranje objekata koji su preveliki da bi bili vidljivi golim okom, kao što su ćelije, mikroorganizmi i drugi sitni objekti. Mikroskop povećava sliku malih objekata pomoću sočiva ili drugih optičkih komponenti, kao što su objektiv i okulari.

Model mikroskopa koji je korišćen za posmatranje i merenje objekata je *Mustool G600 Digital* prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1 – Mikroskop *Mustool G600 Digital*

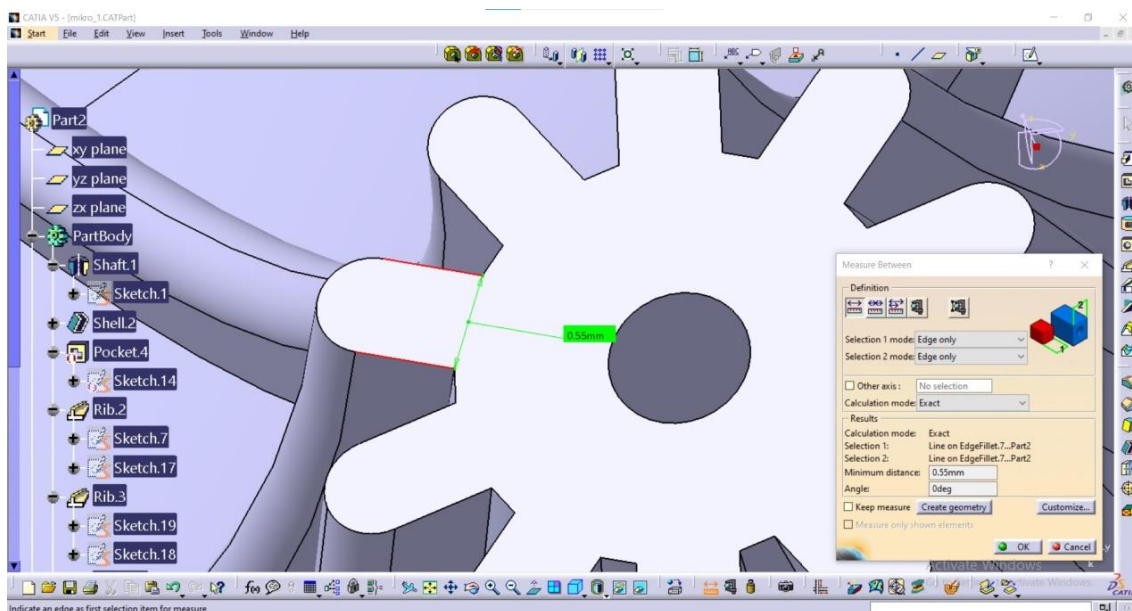
Ovaj model mikroskopa poseduje mogućnost uvećavanja i do 600 puta sa distancom od posmatranog objekta od najmanje 15 milimetara. Digitalni mikroskop se sastoji od LCD ekrana i kamere od 3,6 megapiksela. Za čuvanje i skladištenje podataka i slika koristi se MicroSD memorijska kartica od 64 GB. Na prednjoj strani mikroskopa nalaze se tasteri koji se koriste za uključivanje, pristup meniju, izbor moda, kao i strelice i taster OK. Na zadnjoj strani nalaze se mini USB, slot za memorijsku karticu, kao i potenciometar za podešavanje osvetljenja dioda u kameri.

4.2. Merenje

Naredni zadatak koji je potrebno izvršiti jeste merenje prethodno izrađenog 3D modela. Za merenje je korišćen opisani mikroskop *Mustool G600 Digital*. U merni prostor se postavlja deo na koji se prisloni etalon. U našem slučaju etalon je struna debljine 180 mikrometara. Zaokretanjem zavrtnja se fokusira slika i dobija se uveličan i jasan prikaz dela na displeju. Slika se čuva na SD kartici koja je prethodno ubačena.

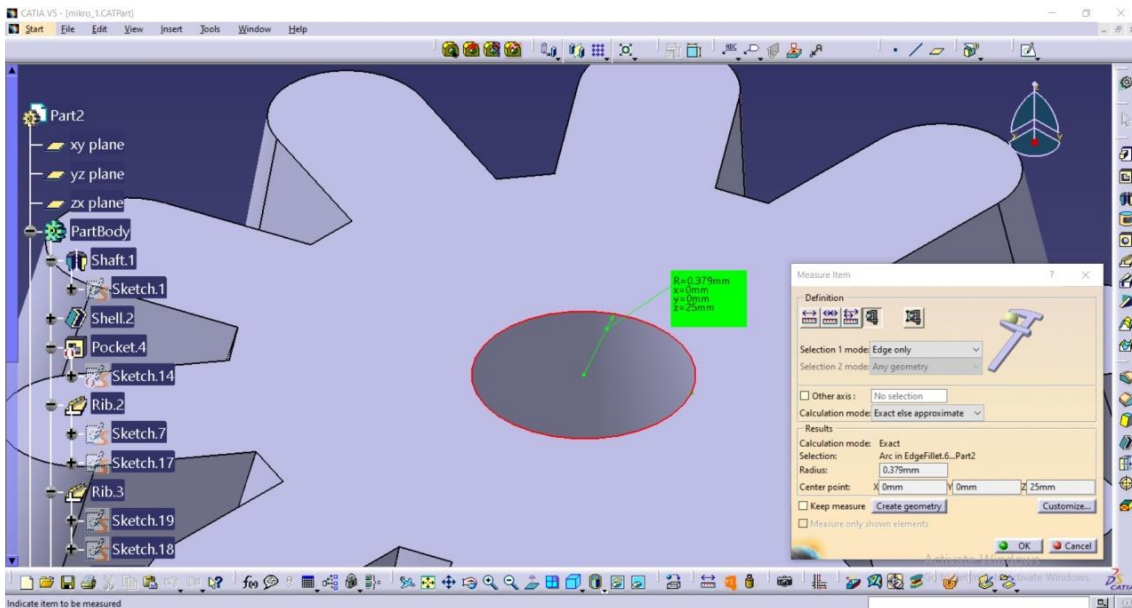
Sledeći korak je merenje u programu *Digimizer 6.4.3*. Na početku je potrebno uvesti sliku dobijenu na mikroskopu. Zatim se povlači linija koja predstavlja debljinu etalona tj strune (primer slika 4.4). S obzirom na to da je poznata stvarna debljina strune, program preračunava veličinu piksela.

Prvi mikro primitiv koji treba proveriti je debljina rebara koja prate konturu kupole, organizovana u desetokraku zvezdu. Kako se poprečni presek vidi u pravoj veličini na vrhu kupole, možemo na istom meriti debljinu. Uzećemo jedno rebro za proveru. Na osnovu CAD modela ova veličina je 0.55 mm, tj. 550 μm (slika 4.2).



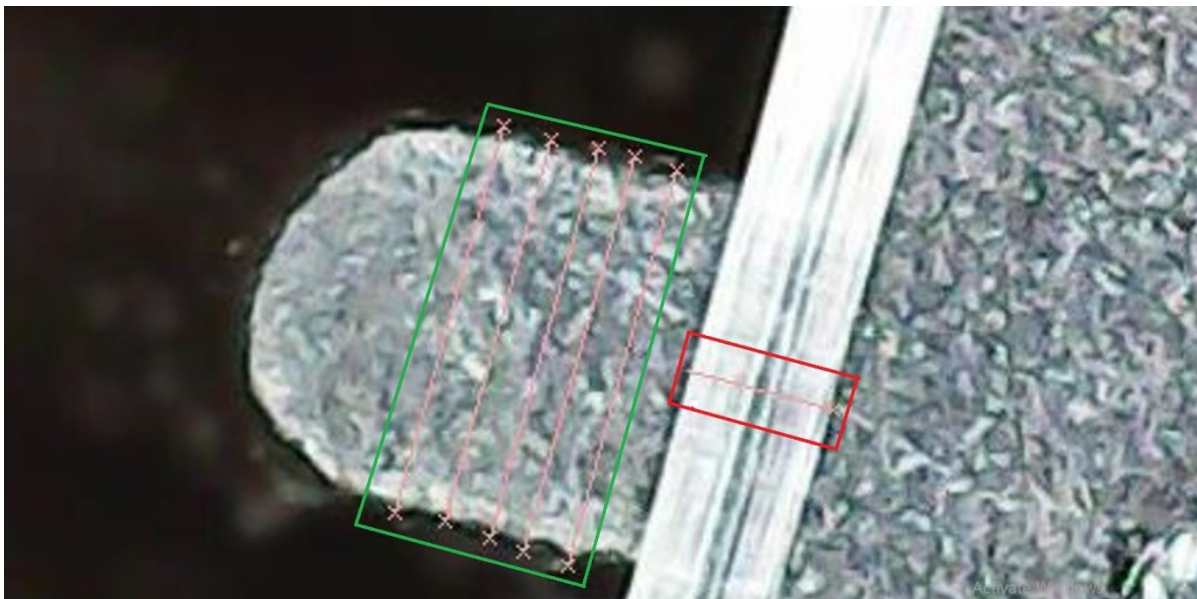
Slika 4.2 – Debljina rebra kupole u CAD modelu

Postupak će se dalje ponoviti i za drugi ispitivani mikro primitiv modelirane kupole – otvor na vrhu kupole, kome treba proveriti dimenziju prečnika koji je na osnovu CAD modela 0.758 mm, tj. 758 μm u prečniku (379 μm radijus) (slika 4.3).



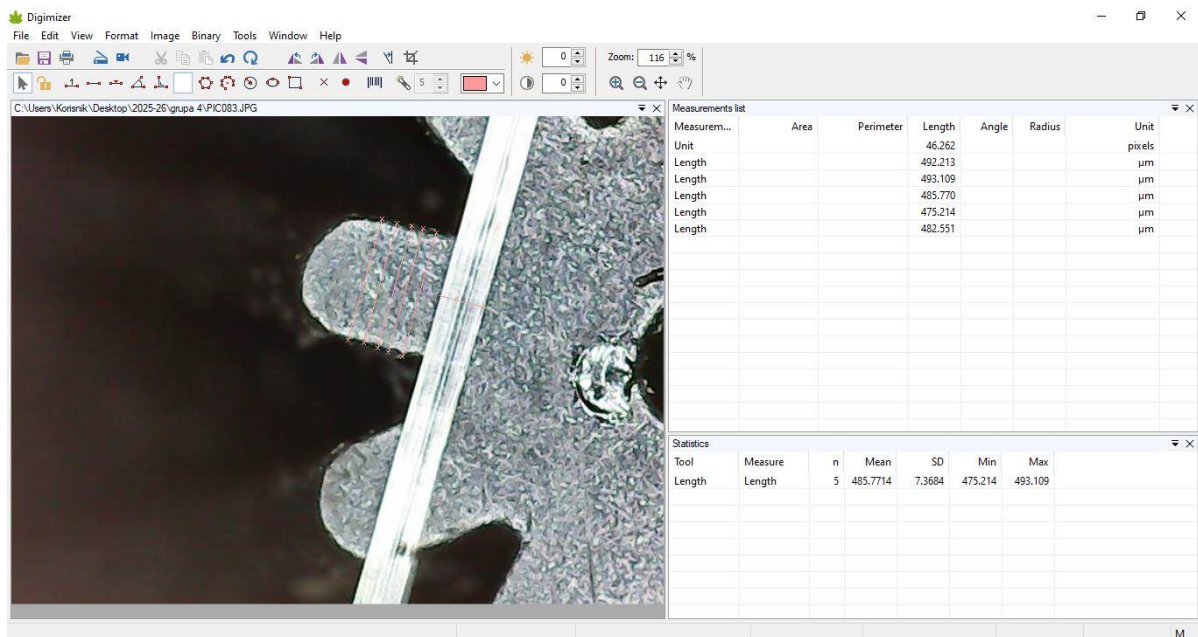
Slika 4.3 – Prečnik otvora na vrhu kupole u CAD modelu

Nakon toga, kako bi se ispunila sva pravila validnog merenja, potrebno je povući pet linija koje bi predstavljale dužinu koja se meri (na slici 4.4 etalon je zaokružen crvenom bojom, a linije merenja zelenom).



Slika 4.4 – Etalon (crveni pravougaonik) i merene debljine (zeleni pravougaonik)

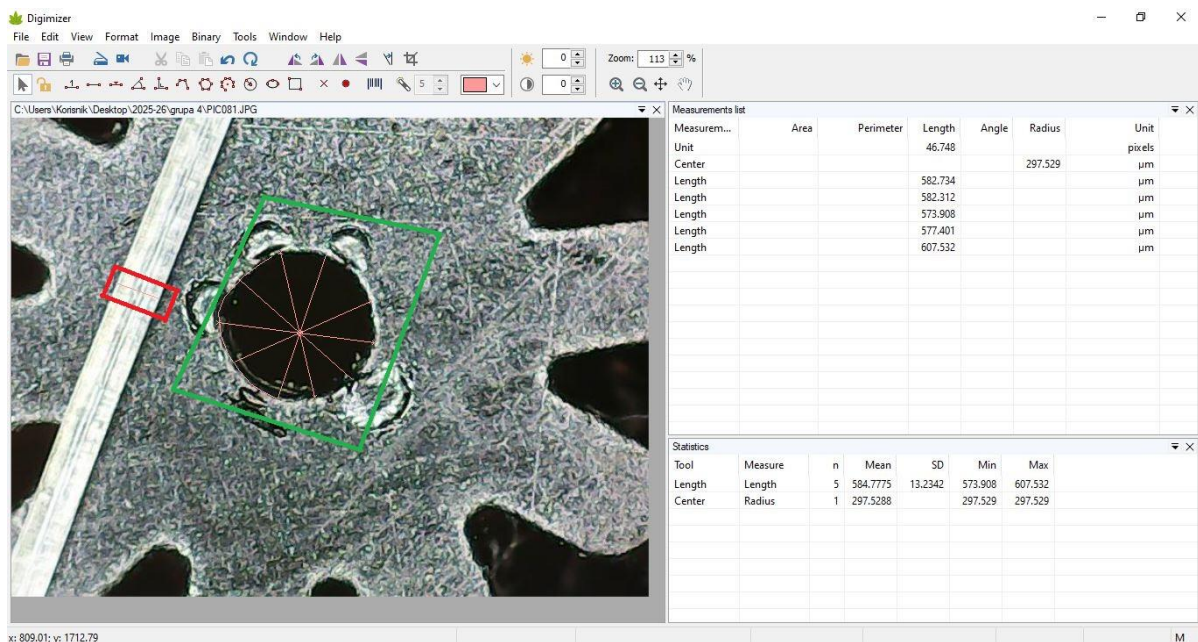
Program izračunava srednje vrednosti, na osnovu kojih se može izvršiti analiza. Dobijeni i izračunati podaci prikazuju se tabelarno kao na slici 4.5.



Slika 4.5 – Prikaz merenja rebra kupole

Nakon povlačenja 5 linija, kojima merimo debljinu rebra, možemo videti u prozoru *Statistics* da srednja izmerena debljina rebra iznosi 485.7714 μm i usvaja se kao izmerena debljina rebra.

Ponavljanjem istog postupka za drugi primitiv dobijamo:



Slika 4.6 – Merenje otvora na vrhu kupole (crvena boja – etalon, zelena boja – mere otvora)

Poluprečnik otvora se merio postavljanjem 5 tačaka po ivici otvora pomoću kojih je softver izračunao poziciju centra otvora, a time i poluprečnik istog. Ponovo, u prozoru *Statistics* možemo videti da izmeren poluprečnik otvora iznosi 297.5288 μm .

4.3. Analiza dobijenih rezultata merenja

Analiza i merenje je izvršeno na prikazanom modelu izrađenom od fotosenzitivne smole. Na osnovu dobijenih vrednosti merenja može se izvršiti analiza i poređenje. Rezultate treba uporediti sa dimenzijama na CAD modelu koje su prethodno predstavljene.

Apsolutna greška rebra kupole iznosi:

$$\delta_1 = |x_{CAD} - x_{mereno}| = |550 - 485.7714| = 64.2286 \mu\text{m}$$

Relativna greška rebra kupole iznosi:

$$\Delta\delta_1 = \frac{\delta_1}{|x_{CAD}|} \cdot 100\% = \frac{64.2286}{|550|} \cdot 100\% = 11.68 \%$$

Apsolutna greška otvora kupole iznosi:

$$\delta_2 = |x_{CAD} - x_{mereno}| = |379 - 297.5288| = 81.4712 \mu\text{m}$$

Relativna greška otvora kupole iznosi:

$$\Delta\delta_2 = \frac{\delta_2}{|x_{CAD}|} \cdot 100\% = \frac{81.4712}{|379|} \cdot 100\% = 21.5 \%$$

5. ZAKLJUČAK

Dobijene vrednosti izmerenih dimenzija mogu varirati u odnosu na zadate u CAD modelu. Ovo odstupanje je posledica kako izabrane tehnologije, koja je u ovom slučaju *mSLA* tehnologija aditivne proizvodnje, tako i same pripreme modela, kvaliteta mreže prilikom generisanja *STL* fajla, rezolucije LCD ekrana odabranog štampača i slično. Izabrani materijal, procenat skupljanja i okolina (vlažnost vazduha, temperatura itd.) u kojoj se model izrađuje su takođe faktori koji utiču na krajnji rezultat. Konačno, rezolucija mikroskopa i pravilnost izvođenja postupka merenja mogu imati veliki uticaj na rezultat merenja. Relativna razlika u visini pozicionirane strune i površine modela ima negativan uticaj na tačnost merenja.

Odstupanja od 11.68% za rebro kupole i 21.5% kod otvora kupole su u ovom slučaju prihvatljiva, s obzirom na to da su kupole veoma malih dimenzija primitiva i da izrada kupola spada u oblast hobi štampe. U slučaju industrijske primene, postojala bi potreba za preciznijim merenjem, a potencijalno i za profesionalnim industrijskim štampačem.

6. LITERATURA

- [1] Bojović B.: Mikro aditivne proizvodne tehnologije, Izvodi sa predavanja iz predmeta Mikro obrada i karakterizacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2025/26.
- [2] <https://ardetails.home.blog/2020/09/15/catenary-arch-not-a-parabola/>, pristup: decembar 2025.
- [3] <https://sh.wikipedia.org/wiki/Kupola>, pristup: decembar 2025.
- [4] Bojović B.: Izvodi sa predavanja iz predmeta Mikro obrada i karakterizacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2025/26.
- [5] Popović M., Pjević M.: APT_1-5, Izvodi sa predavanja iz predmeta Aditivne proizvodne tehnologije, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2023/24.
- [6] Lazarević N., Anđelić K., Lazić A., Popović M., Pjević M.: *Uticaj promene parametara na mehanička svojstva proizvoda dobijenih aditivnim tehnologijama*, Zbornik radova sa Jupiter konferencije, Beograd 2024, str. 120-126.
- [7] Popović M., Pjević M.: APT_11-22, Izvodi sa predavanja iz predmeta Aditivne proizvodne tehnologije, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2023/24.
- [8] [general resin tds 20240905- en.pdf](#)