

Numerička analiza naprezanja zuba sa ispunama i stomatološkim ljepilom

Habus, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:638362>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-24**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



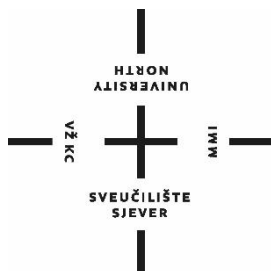
DIPLOMSKI RAD br. 103/STR/2023

**NUMERIČKA ANALIZA NAPREZANJA
ZUBA SA ISPUNAMA I
STOMATOLOŠKIM LJEPILOM**

Bruno Habus

Varaždin, listopad 2023.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij strojarstva



DIPLOMSKI RAD br. 103/STR/2023

NUMERIČKA ANALIZA NAPREZANJA
ZUBA SA ISPUNAMA I
STOMATOLOŠKIM LJEPILOM

Student:

Bruno Habus,
0069081640

Mentor:

doc. dr. sc. Jasna
Leder Horina, mag.ing.mech.

Varaždin, listopad 2023.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

| | | | |
|-----------------------------|--|--------------|-----------------------|
| ODJEL | Strojarstvo | | |
| STUDIJ | Sveučilišni diplomski studij strojarstva | | |
| PRISTUPNIK | Bruno Habus | MATIČNI BROJ | 0069081640 |
| DATUM | 16.10.2023. | KOLEGIJ | Numeričko modeliranje |
| NASLOV RADA | Numerička analiza naprezanja zuba sa ispunama i stomatološkim ljepljom | | |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Numerical analysis of tooth with dental filling and dental adhesive | | |
| MENTOR | doc.dr.sc. Jasna Leder Horina | ZVANJE | docent |
| ČLANOVI POVJERENSTVA | 1. doc.dr.sc. Matija Bušić, predsjednik povjerenstva | | |
| | 2. doc.dr.sc. Zlatko Botak, član povjerenstva | | |
| | 3. doc.dr.sc. Jasna Leder Horina, mentor | | |
| | 4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjena | | |
| | 5. _____ | | |

Zadatak diplomskog rada

BROJ 103/STR/2023

OPIS

Karijes je jedan od velikih problema u svakodnevnom životu te razne grane znanosti pokušavaju svojim pristupom riješiti taj problem. Tu veliku ulogu ima razvoj materijala, kao i razvoj medicinskih uređaja koji olakšavaju rješavanje karijesa. Stomatolozi uz pomoć medicinskih uređaja uklanjaju karijes te stavljaju ispune koje danas mogu biti izrađene od raznih biokompatibilnih materijala.

Ono što je poznato s biomehaničkog stajališta je da na zdrav zub, kao i na zub sa ispunom, djeluju razna mehanička opterećenja u usnoj šupljini koja su posljedica žvakanja. Te, kako je poznato, ta mehanička opterećenja mogu biti pod raznim kutevima s obzirom na središnju os zuba. Opterećenja će uzrokovati naprezanja koja se mogu proračunati uz pomoć numeričkih simulacija pomoću metode konačnih elemenata te na taj način procijentl čvrstoću zuba i ispune.

U radu je potrebno na dobivenom 3D modelu zuba napraviti kavitet gdje dolazi ispuna, prema dimenzijama iz literature, i potom napraviti numeričku analizu u softveru za metodu konačnih elemenata.

Potrebno je napraviti analizu na zdravom zubu, te na zubu koji ima ispunu od amalgama, kompozitne smole, equia forte te kada se koristi sa ispunama stomatološko ljeplilo. Sve analize trebaju biti napravljene s 3 različita opterećenja koja zamjenjuju utjecaj žvačne sile.

Opterećenja i svojstva materijala definirati na temelju vrijednosti dostupnih iz literature.

ZADATAK URUŽEN

17.10.2023



Jasna Leder Horina

Sveučilište Sjever

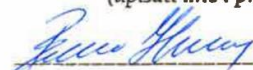
SVUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Bruno Habus (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Numerička analiza naprezanja zuba sa ispunama i stomatološkim ljepljom (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)



(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

Predgovor

Iskoristio bih ovu priliku da zahvalim prije svega roditeljima i obitelji, na pruženoj podršci tijekom mog cijelog školovanja, a poglavito tijekom diplomskog studija strojarstva. Hvala što ste mi pomogli da savladam studijske i sve druge poteškoće na koje sam nailazio. Posebnu zahvalu upućujem sestrama i baki na strpljenju i danim savjetima.

Dužnost mi je zahvaliti i tvrtki SATO d.o.o. na financiranju studija, kao i svim zaposlenicima tvrtke na strpljenju i razumijevanju za vrijeme utrošeno na studijske obveze.

Posebno zahvaljujem prijateljima i fakultetskim kolegama, ne samo sa Sveučilišta Sjever, već i sa Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci i Sveučilišta VERN'. Hvala i M.K. na pruženoj moralnoj i emotivnoj podršci.

Ističem zahvalu mentorici doc.dr.sc. Jasni Leder Horina, mag.ing.mech., na pruženim savjetima, pomoći i idejama kako bi ovaj rad bio što kvalitetniji. Valja istaknuti i zahvalu profesorici za potaknuti interes prema primjeni metode konačnih elemenata u strojarstvu.

Na posljétku, hvala dragom Bogu za uspješno savladavanje svih studijskih i dosadašnjih životnih prepreka.

Sažetak

Ovaj je rad osmišljen na način da kroz multidisciplinarni pristup prikaže računalnu numeričku analizu naprezanja u zubu, s različitim vrstama ispune, od starijih poput Amalgama, do ispune novije generacije poput ispune *Equia Forte*. Središte ispitivanja je model zuba koji je opterećen silama različitih iznosa, pod različitim kutovima djelovanja. Model zuba je za potrebe numeričkog ispitivanja metodom konačnih elemenata prilagođen na način da su dodane ispune različitih materijala, zajedno s dva moguća načina fiksiranja ispuna na model zuba. Dobiveni rezultati su analizirani i komentirani s ciljem donošenja zaključka koji od ponuđenih materijala ispuna najbolje doprinosi smanjenju opterećenja na zub.

Ključne riječi: zub, numerička analiza, metoda konačnih elemenata, MKE, ispune, naprezanja, dentin, amalgam, kompozitna smola, equia forte

Summary

This paper is designed to show, through a multidisciplinary approach, a computer numerical analysis of stress in a tooth, with different types of filling, from older fillings such as Amalgam, to newer generation fillings such as Equia Forte filling. The center of the test is a tooth model that is loaded with forces of different amounts, at different angles of action. The tooth model was adapted for numerical testing using the finite element method in such a way that fillings of different materials were added, along with two possible ways of fixing the fillings to the tooth model. The obtained results were analysed and commented with the aim of reaching a conclusion which of the offered filling materials best contributes to reducing the load on the tooth.

Key words: tooth, numerical analysis, finite element method, FEA, fillings, stresses, dentin, amalgam, composite resin, equia forte

Popis korištenih kratica

| | |
|-------------|--|
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuti dizajn |
| CAE | <i>Computer Aided Engineering</i> – računalom potpomognuti inženjering |
| CBCT | <i>Cone beam computed tomography</i> – dentalna konusna kompjuterizirana tomografija |
| FEA | <i>Finite Elements Analysis</i> – metoda konačnih elemenata |
| STEP | Tip datoteke dobiven CAD modeliranjem |
| EQ | <i>Equia Forte</i> – tip stomatološke ispune |
| KS | Kompozitna smola – tip stomatološke ispune |

Popis oznaka

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------|------------------|---|
| α | ° | Kut djelovanja sile na zub |
| α_l | °C ⁻¹ | Linearni koeficijent toplinskog istezanja |
| k | J/s*mm °C | Koeficijent toplinske vodljivosti |
| k | - | Lokalna matrica krutosti |
| K | - | Globalna matrica krutosti |
| F | N | Sila koja djeluje na zub |
| σ_{max} | MPa | Maksimalno naprezanje |
| σ_{min} | MPa | Minimalno naprezanje |
| ϵ_{max} | mm/mm | Maksimalno produljenje/deformacija |
| E | GPa | Youngov modul elastičnosti |
| ν | - | Poissonov koeficijent |

Sadržaj

| | |
|--|-----|
| Predgovor | I |
| Sažetak..... | II |
| Summary | III |
| Popis korištenih kratica..... | IV |
| Popis oznaka | V |
| | |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 1.1 Funkcija i podjela zubi | 2 |
| 1.2 Građa zuba..... | 5 |
| 1.3 Karijes | 6 |
| 2. Materijali zuba | 7 |
| 2.1 Dentin | 7 |
| 2.2 Čaklina | 8 |
| 2.3 Cement..... | 8 |
| 2.4 Pulpa | 9 |
| 3. Vrste i materijali ispuna | 10 |
| 3.1 Klasične plombe | 10 |
| 3.2 <i>Inlay, Onlay</i> i <i>Overlay</i> ispune | 11 |
| 3.3 Amalgam | 12 |
| 3.4 Kompozitna smola..... | 13 |
| 3.5 <i>Equia Forte</i> | 14 |
| 3.6 Stomatološko ljepilo..... | 15 |
| 4. Numerička analiza | 16 |
| 4.1 Autodesk Fusion 360 (Education) | 16 |
| 4.2 Model..... | 17 |
| 4.3 Ansys Workbench..... | 23 |
| 4.3.1 Mreža konačnih elemenata | 26 |
| 4.3.2 Metoda konačnih elemenata | 27 |
| 5. Numerička analiza zuba | 30 |
| 5.1 Vrste analiza..... | 31 |
| 5.2 Svojstva materijala | 32 |
| 5.3 Definiranje geometrije i rubnih uvjeta kontakata | 33 |
| 5.4 Definiranje mreže | 35 |
| 5.5 Definiranje rubnih uvjeta opterećenja | 35 |
| 6. Rezultati i diskusija | 39 |
| 6.1 Diskusija rezultata i komentar..... | 48 |
| 7. Zaključak | 51 |

| | |
|-----------------------|----|
| 8. Literatura | 52 |
| Popis slika | 54 |
| Popis tablica | 56 |
| Popis jednadžbi | 57 |
| Prilozi..... | 58 |

1. Uvod

Tema rada je analiza naprezanja jednokrjenog zuba pri djelovanju sila. Naprezanja su analizirana na način da su sile različitih iznosa i djelovanja iz različitih smjerova narinute na zub s različitim materijalima ispuna te sa i bez dodatka sloja ljepila između ispune i ostatka zuba. U radu je analiziran sjekutić kao jednokrjeni zub, a u istu kategoriju još spadaju i očnjaci.

Cilj rada je analizirati materijale ispuna na način da je moguće iščitati kako koji od materijala ispuna doprinosi povećanju ili smanjenju naprezanja u zubu, posljedično i deformacija. Uz to, cilj je analizirati utjecaj sloja ljepila kao načina fiksiranja ispune na narinuta opterećenja.

Preduvjet kvalitetne numeričke analize je odgovarajući model zuba. U konkretnom slučaju korišten je model stvarnog zuba dobiven CBCT snimkom, koji je uz pomoć softvera za obradu podataka obrađen u odgovarajuću geometriju iz koje je dobiven CAD model. Isti model je uređen i oblikovan na način prikladan za analizu metodom konačnih elemenata.

FEA analiza je definirana geometrijom zuba obrađenom u CAD programu, svojstvima materijala zuba i ispuna (vrijednosti preuzete iz dostupne literature) i silama različitih iznosa i pozicija (hvatišta).

1.1 Funkcija i podjela zubi

Zubi su organi koji se nalaze na početku probavnog trakta, odnosno u usnoj šupljini većine sisavaca [1]. Iako se smatraju kostima, oni to nisu već su to kalcificirani organi. Zdrava osoba u usnoj šupljini ima 32 trajna (stalna) zuba i 20 mliječnih zubi. Zubi su ugrađeni na dvije čeljusti (gornju i donju) odnosno na njihove alveolarne nastavke [1].

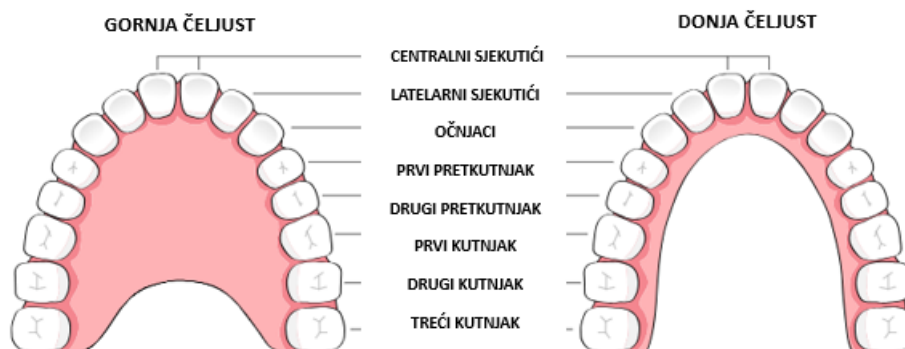
Tijekom životnog vijeka čovjeka, zubi izbijaju dva puta. Prvi zubi počinju izbijati od 6. mjeseca djetetova života, a te zube nazivamo mliječnima. Mliječnih zubi ima 20, a počinju ispadati oko 6. godine života, nakon čega rastu trajni zubi. Izmjena mliječnih i trajnih zubi najčešće traje do 12. godine. Iznimka je posljednji ili treći kutnjak (poznatiji kao zub mudrosti), koji u pravilu izbija od 18. do 25. godine, a kod nekih pojedinaca nikada.

Iako je zub svojim biomehaničkim svojstvima namijenjen da traje cijelog čovjekova života, zbog raznih bolesti zubi i ostalih bolesti usne šupljine uobičajena je pojava otpadanja ili vađenja trajnih zubi. Bolestima zubi se bavi stomatološka grana medicine.

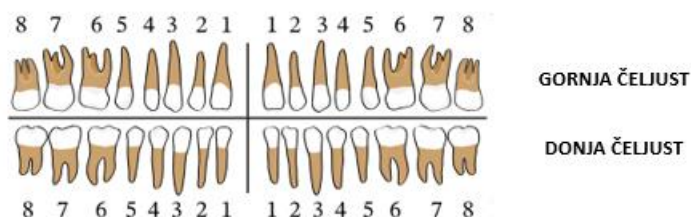
Prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije, procijenjeno je da danas u svijetu 2 milijarde ljudi boluje od karijesa trajnih zubi te 514 milijuna djece boluje od karijesa mliječnih zubi [2]. Ne ulazeći u uzroke nastanka istog, karijes se najčešće liječi konzervativno, odstranjivanjem zahvaćenog dijela zuba koji se ispunjava nekom od ispuna koje svojstvima približno odgovaraju biomehaničkoj anatomiji zuba.

Promatrajući položaj zubi u usnoj šupljini, gledajući od sredine lice prema obje strane, postoje slijedeće vrste zubi: 4 sjekutića, 2 očnjaka, 4 pretkutnjaka i 6 kutnjaka. S obzirom na funkciju, sjekutići služe za odgrizanje, očnjaci držanju i otkidanju, pretkutnjaci za mljevenje i kutnjaci za žvakanje. Uz najvažniju funkciju konzumacije hrane, zubi imaju važnu ulogu u govoru.

Detaljnija podjela zubi dijeli sjekutiće na središnje (centralne) koji su prednja dva zuba na gornjoj i donjoj čeljusti. Zatim lateralne sjekutiće, očnjake, prve i druge pretkutnjake te na kraju, prve, druge i treće kutnjake. Prikaz položaja zubi u čeljusti kao i oblika pojedinih zubi je prikazan na slikama 1.1 i 1.2.



Slika 1.1: Pregled rasporeda zubi na gornjoj i donjoj čeljusti [3]



Slika 1.2.: Pregled oblika zubi prema položaju u čeljusti [3]

Općenito, zubi se mogu podijeliti prema vremenu izrastanja, morfološkom obliku kao i položaju na čeljusti, odnosno na dentalnom luku. Prema vremenu izrastanja ih dijelimo na mliječne (primarne, 20 zubi) i na trajne (stalne, 32 zuba). Mliječni počinju izrastati od 6. godine života a prosječna dob promjene mliječnih zubi s trajnima je 12. Postoji i međufaza prilikom koje su prisutni i mliječni i trajni zubi, a taj se period naziva mješovitom denticijom.

Morfološka podjela podrazumijeva podjelu prema obliku, odnosno namjeni zuba i to na sjekutiće, očnjake, pretkutnjake i kutnjake.

Sukladno položaju u dentalnom luku, odnosno položaju zuba na čeljusti, dijele se na gornje i donje, desne i lijeve te prednje i bočne zube. Dentalni luk je naziv za sklop zubi na čeljusti. Tzv. gornji dentalni luk je eliptičnog oblika, dok je donji paraboličan. Isto je vidljivo na slici 1.1.

U svrhu unificiranja nazivlja, Svjetska dentalna federacija je osmislila način numeriranja zubi koji je danas najviše korišten. Tzv. FDI metoda numerira zube po kvadrantima (za trajne 1 gore desno, 2 gore lijevo, 3 dolje desno, 4 dolje lijevo i za mliječne posljedično 5, 6, 7 i 8), odnosno ovisno o položaju zuba i o tome je li zub trajni ili mliječni. Tablica 1 prikazuje numeraciju zuba prema FDI metodi.

Tablica 1: FDI metoda numeriranja zubi

| TRAJNI ZUBI | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Pacijentovo gore desno | | | | | | | | Pacijentovo gore lijevo | | | | | | | |
| 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| 48 | 47 | 46 | 45 | 44 | 43 | 42 | 41 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| Pacijentovo dolje desno | | | | | | | | Pacijentovo dolje lijevo | | | | | | | |
| MLIJEČNI ZUBI | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pacijentovo gore desno | | | | | | | | Pacijentovo gore lijevo | | | | | | | |
| | | | 55 | 54 | 53 | 52 | 51 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | | | |
| | | | 85 | 84 | 83 | 82 | 81 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | | | |
| Pacijentovo dolje desno | | | | | | | | Pacijentovo dolje lijevo | | | | | | | |

Sjekutići

Sjekutići su zubi smješteni na najisturenijoj točki čeljusti, odmah iza usnog otvora. Ukupno je 8 sjekutića (4 u gornjoj i 4 u donjoj čeljusti). Svrha sjekutića prilikom konzumacije hrane je sjeckanje i prerezivanje, što je definirano i oblikom s obzirom da sjekutići nemaju vrh, nego rub zuba.

Očnjaci

Postoji 4 očnjaka, po 2 na svakoj čeljusti, a odvajaju sjekutiće od pretkutnjaka. Funkcijom se nadopunjuju sjekutićima, uz to što služe za otkidanje hrane kod žvakanja.

Prekutnjaci

Prekutnjaci su smješteni između očnjaka i kutnjaka, a dijele se na prve (bliže ustima) i druge. Funkcijom mogu služiti i za otkidanje, sjeckanje kao i mljevenje hrane.

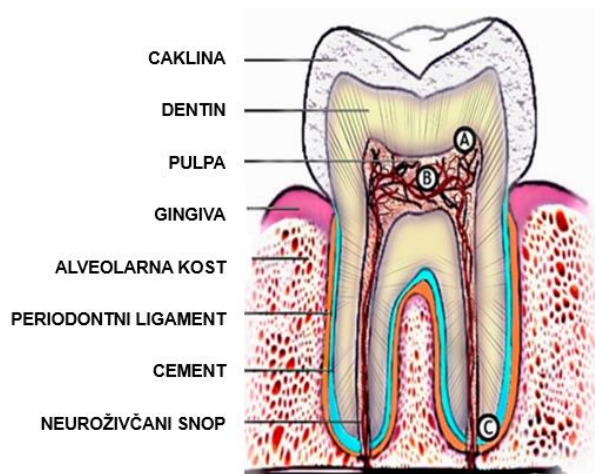
Kutnjaci

Kutnjacima ne prethode mliječni zubi. Funkcija je mljevenje hrane prilikom žvakanja.

1.2 Građa zuba

Zub je kalcificirani organ, a građen je od četiri osnovna tkiva: caklina, dentin, cement i pulpa. Zubu čvrstoću daju caklina, dentin i cement, dok je pulpa meko tkivo. Zub se s obzirom na sastav i vertikalni položaj može podijeliti na krunu (vidljivi dio) i korijen, pri čemu se kruna sastoji od cakline i dentina, a korijen od pulpe i cementa.

Pulpa je meko tkivo koje se sastoji od vezivnog tkiva, krvnih žila i živaca. Primarna uloga pulpe je prehrana, oblikovanje i zaštita zuba. Zub je za kost čeljusti fiksiran periodontnim ligamentom, a tkivo koje okružuje zub i prekriva kost (zubno meso) se naziva gingiva. Slika 1.3 prikazuje vertikalni presjek zuba s osnovnim elementima građe.



Slika 1.3: Građa zuba [4]

1.3 Karijes

Karijes je trajno oštećenje ili šupljina koja nastaje na zubu zbog šećera, bakterija i posljedičnog raspada tvrdih zubnih struktura. Karijes u pravilu nije vidljiv dok ne probije caklinu i zahvati dentin, kada je posljedica prisutnosti bakterija imunološki odgovor zuba tj. oticanje pulpe što uzrokuje zubobolju.

Karijes je najčešća bolest zubi, što potvrđuje Svjetska zdravstvena organizacija s podatkom da u svijetu 2 milijarde odraslih (trajni zubi) i 514 milijuna djece (mliječni zub) boluje od karijesa [2].

Karijes nastaje zbog velikog broja bakterija prisutnih u ustima, a kojima pogoduje okolina bogata šećerom. Fermentacija šećera uzrokuje kiselost koja potpomaže deterioraciji i demineralizaciji cakline. Jednom kad je sloj cakline uništen, dentin postaje izložen bakterijama koje ga počinju razgrađivati. Slika 1.4 prikazuje izgled karijesa zuba po vertikalnom presjeku.



Slika 1.4: Pojava karijesa [16]

2. Materijali zuba

Zub tvore 4 osnovna materijala: caklina, dentin, cement i pulpa. Jedinstveni skup i sinergija spomenutih materijala čine zub živim, što ih čini kalcificiranim organima. Zub ima čvrstoću zahvaljujući caklini, dentinu i cementu, dok je pulpa meko želatinasto tkivo.

2.1 Dentin

Dentin je osnovna tvar koja tvori zub. Izgledom žuta tvar tvori boju zuba, zbog relativne prozirnosti cakline koja ga prekriva. Volumenom, 45% dentina se sastoji od mineralnog hidroksiapatita, 33% od ostalog organskog materijala i 22% od vode [6]. Dentin služi kao podkonstrukcija caklini, a svojstvima je manje krhak u odnosu na istu. Tvrdoćom dentin odgovara razini 3 tvrdoće po Mohsu [6]. Dentin se razvija kroz cijeli životni vijek, a za razliku od cakline dentin je premrežen krajevima živaca, što mu daje osjetljivost. Jedan od najučestalijih bolova i neugodnosti zuba je preosjetljivost na toplo i hladno, što je uzrokovano otvaranjem kanalića u caklini i posljedično doticaja hladne i vruće tvari s dentinom.

Dentin se može klasificirati u 3 klase, s obzirom na vrijeme nastanka i položaj unutar zuba. Primarni dentin je onaj koji se nalazi pri vrhu zuba, između cakline i pulpe. To je ujedno najdeblji sloj dentina koji prvi nastaje prilikom rasta i formacije zuba. Sekundarni dentin nastaje nakon što je završio razvoj korijena zuba, odnosno prilikom izbijanja zuba iz gingive kada zub postaje funkcionalan. Tercijarni dentin se razvije tijekom cijelog životnog vijeka, a karakterističan je kao reakcija na vanjske utjecaje, odnosno karijese, trošenje, pucanje zuba i sl.

2.2 Caklina

Caklina je najtvrdi dio zuba i jedini oku vidljivi dio. Caklina je ujedno i najviše mineralizirana tvar na tijelu, a sastavljena je od 96% minerala, dok ostatak čine ostali organski spojevi i voda [7]. Debljina cakline ovisi o vrsti i položaju zuba, a najdeblja je na vrhu, odnosno na dijelu koji je najviše sklon mehaničkom trošenju.

Tvrdoća cakline iznosi 5 na ljestvici tvrdoće po Mohsu [7], a minerali koji utječu na tvrdoću cakline također utječu i na povećanu krhkost. U odnosu na dentin i kosti, caklina ne sadrži kolagen koji je zaslužan za regeneraciju kosti. Također su zabilježeni slučajevi u kojima caklina uopće ili nije u potpunosti razvijena, pa zub u tom slučaju ostaje s izloženim dentinom, bez odgovarajućeg pokrova koji bi zub štiti od mehaničkog trošenja, kao i od kiselina prilikom unošenja hrane i pića.

2.3 Cement

Cement je kalcificirano tkivo koje prekriva korijen zuba, a zajedno s periodontnim ligamentom tvori sklop koji spaja zub s kosti. Cement nastaje izlučivanjem stanica cementoblasta, a po strukturi je sličan s kostima. Cement u zdravih osoba nije vidljiv, već je prekriven gingivom. Izbijanje cementa iznad površine zubnog mesa ukazuje na neku od bolesti, poput paradentoze.

Po svojstvima, cement je mekši od cakline, a sastavljen je od 45-50% masenog udjela hidroksilapatita (anorganskog materijala) i 50-55% masenog udjela organskih tvari, uključujući vodu i kolagen [8]. Cement je najdeblji u korijenu zuba (1-2 mm), a stvara se i regenerira tijekom cijelog života (prisutnost kolagena).

2.4 Pulpa

Pulpa je vezivno živo tkivo koje se sastoji od živaca, krvnih žila i odontoblasta, odnosno stanica koje tvore ostatak zuba. Smještena je u središtu zuba, u tzv. pulpnoj komori, ali i u korijenu zuba, odnosno korijenskom kanalu.

Osnovne funkcije pulpe uključuju zaštitu od bakterija kroz vlastiti imunološki sustav, funkciju osjeta što uključuje promjenu temperature i pritiska, stvaranje i regeneracija dentina, proizvodnja nutrijenata zuba i vlaženje zuba. Starenjem se sužava šupljina u kojoj se nalazi pulpa, a zbog trajnog stvaranja dentina. Slika 2.1 prikazuje povezanost pulpe s ostatkom tjelesnog živčanog i krvožilnog sustava.



Slika 2.1: Povezanost pulpe sa živčanim i krvožilnim sustavom [17]

3. Vrste i materijali ispuna

Zubne ispune odnosno zubne plombe su ispune koje se postavljaju na mjesto na zubu zahvaćeno karijesom. Karijes se liječi odstranjivanjem dijela zahvaćenog zuba (u ekstremnim slučajevima uklanjanja cijelog zuba), te je po uklanjanju potrebno zub zatvoriti ispunom, kako bi se zubu vratila glavna funkcija, kako bi se zaštitio dentin i pulpa od prisutnosti oralnih bakterija te kako bi se zubu vratila estetska funkcija.

3.1 Klasične plombe

Plombe se u stomatologiji koriste za ispunjavanje manjih šupljina koje su nastale uklanjanjem zubnog materijala zahvaćenog karijesom. Plombe imaju važne funkcije koje uključuju zaštitu dentina i pulpe od bakterija, ponovnu funkciju zuba kao i estetsku funkciju.

Postoje dva osnovna tipa ispuna za plombe, amalgamski (starije generacije, sadrže metale) i kompozitni (novije generacije, ne sadrže metale). Uporaba kompozitnih ispuna je sve češća zbog mogućih štetnih utjecaja žive iz amalgamskih ispuna i zbog estetskih razloga.

Plomba se nanosi na način da se zahvaćeni dio zuba očisti, osuši te se materijal ispune nanosi u slojevima. Posljednji slojevi ispune se oblikuju prema zagrizu, a kako ne bi smetali susjednim zubima prilikom zagrizava. Slika 3.1 prikazuje usporedbu istih zuba s amalgamskom plombom koja je skinuta i zamijenjena kompozitnom.



Slika 3.1: Usporedba amalgamske i kompozitne ispune (plombe) na istim zubima [18]

3.2 Inlay, Onlay i Overlay ispune

Inlay, *Onlay* i *Overlay* ispune su protetske ispune koje služe za nadoknađivanje dijela zuba koji je uklonjen zbog karijesa ili je otkinut traumom. Osnovna razlika između plombi i navedenih ispuna je ta što se za *Inlay*, *Onlay* i *Overlay* ispune uzimaju otisci zuba, odnosno ispuna je prilagođena obliku zuba. Navedeni način omogućava bolje prijanjanje što smanjuje šansu ispadanja ili pucanja ispune. Slika 3.2 prikazuje usporedbu *Inlay*, *Onlay* i *Overlay* ispuna.



Slika 3.2: Usporedba *Inlay*, *Onlay* i *Overlay* ispuna [18]

Osnovna razlika između spomenuta tri tipa ispuna je njihova veličina, odnosno područje prekrivanja. *Inlay* je tip ispune koji se koristi za ispunu šupljina na sredini zuba te je volumenom i površinom najmanji tip protetske ispune. *Onlay* ispuna prekriva cijeli vrh zuba i prelazi rubove, tvoreći pokrov preko cijelog zuba. *Overlay* je najveći od navedenih tipova ispuna i osim što prekriva vrh zuba, prekriva gotovo i cijelu vanjsku konstrukciju zuba zbog čega se nazivaju i djelomičnim krunama.

Inlay, *Onlay* i *Overlay* ispune se koriste za tretiranje i rekonstrukciju stražnjih zubi (od pretkutnjaka prema iza), dok se za prednje zube koriste tzv. zubne ljuskice. Prednosti takvih ispuna uključuju estetski izgled zuba koji je unificiran, ali i omogućuju stomatolozima izbor u pogledu razine oštećenja zuba. Ukoliko je oštećenje preveliko za klasične plombe, a premalo za potpunu protetsku krunu, *Inlay*, *Onlay* i *Overlay* ispune se mogu prilagoditi veličini i djelu zahvaćenosti zuba.

Otisak za takve vrste ispuna se može uzeti konzervativnim metodama (zagriz i ručno modeliranje) ili CAD/CAM tehnologijama snimanja i računalnog oblikovanja ispune. Materijali navedenih ispuna su najčešće kompoziti s keramičkim vlaknima.

3.3 Amalgam

Amalgam je naziv za slitinu žive s jednim od metala koji uključuju zlato, srebro, platinu, bakar, cink i aluminij. U stomatologiji se amalgam koristi kao ispuna za popravljavanje odnosno restauraciju zubi.

Amalgam je u stomatologiji prisutan od početka 1800tih [9], a najviše se koristi zbog relativno lagane aplikacije, trajnosti, otpornosti na mehaničko trošenje i bakteriostatičkih efekata. Amalgam u novije vrijeme koristi sve rjeđe, uglavnom zbog svoje sive boje odnosno estetskih razloga, ali i zbog potencijalnih negativnih učinaka žive, zbog kojih je Europska Unija 2018. godine zabranila korištenje amalgama u restauraciji zuba za djecu mlađu od 15 godina, trudnice i dojilje.

Po sastavu, stomatološki amalgam se sastoji od prosječno 43-54% žive, 20-35% srebra, 10% kalija ili bakra i 2% cinka [9]. Sastav amalgama za korištenje u stomatologiji je propisan normom ISO 1559. Kod amalgama je također primijećena i plastična deformacija uzrokovana puzanjem materijala. Zbog interdentalnih sila uzrokovanih žvakanjem i mljevenjem hrane dolazi to tečenja amalgama od centra amalgamske ispune (ako se nalazi na vrhu zuba) prema rubovima, što s vremenom uzrokuje rupu u amalgamskoj ispuni. Uz to, moguća je pojava deformacije amalgamske ispune netom nakon postavljanja, a zbog potrebnih i do 24 sata za potpuno otvrdnuće nakon aplikacije.

3.4 Kompozitna smola

Kompozitna smola, ili češće nazvano samo kompozit, koristi se u stomatologiji 50ak godina. Korištenje kompozitne smole je s godinama raslo zbog estetskih razloga (bijela boja), ali i zbog sve veće zabrinutosti zbog mogućih loših utjecaja žive amalgamskih ispuna. Pojedini podatci govore kako se danas za više od 95% popravaka prednjih zubi i za više od 50% popravaka stražnjih zubi koristi kompozitna smola [11]. Kompozitne smole za restauraciju i popravak zubi se nalaze na listi esencijalnih liječničkih pripravaka Svjetske zdravstvene organizacije.

Kompozitne smole se sastoje od dimetakriatnih monomera (TEGMA, UDMA, HDDMA) [12], silicijevog dioksida i fotoinicijatora (zbog stvrdnjavanja pomoću aplikacije UV svjetla). Uz silicijev dioksid za ispunu se mogu koristiti i litij/barij-aluminijsko staklo, borosilikatno staklo koje sadrži cink, stroncij ili litij. Postoje i keramičke ispune, najčešće cirkon oksidi.

S obzirom na veličinu zrna ispune, kompozitne smole se dijele na makroispunjene ispune (veličina zrna 5-10 μm), mikroispunjene ispune (veličina zrna do 0,4 μm), hibridne ispune (zrna različite veličine koja čine do 85% masenog udjela), nanoispunjene ispune (veličina 20-70 nm) i *bulk* ispune (zrna od silicija i cirkona, do 77% masenog udjela).

3.5 Equia Forte

Equia Forte je komercijalni naziv za novu generaciju kompozitnih ispuna za restauraciju zuba. Bazira se na staklenoj ispuni (staklena hibridna ispuna), odnosno staklena vlakna preuzimaju ulogu matrice u kompozitu.

Equia Forte se prvi puta pojavila 2007., a dodatno je unaprijeđena 2014. godine. Od svih trenutno dostupnih materijala za ispune dostupnih na tržištu, *Equia Forte* ima najbolju biokompatibilnost i biomehanička svojstva. Zbog hidrofilnih svojstava nanošenje je jednostavnije, stvrdnjavanje brže, a rizik od naknadne deformacije manji. Klinička ispitivanja su pokazala kako je pucanje ispune zabilježeno u manje od 3% kliničkih slučajeva [13].

Equia Forte je nastao kombinacijom staklenoionomernih cemenata i niskoviskoznih premaza. Ultra fine čestice stakla raspršene unutar ispune (punila) povećavaju raspoloživost iona čime stvaraju snažnije strukturne matrice što za posljedicu ima poboljšana mehanička svojstva, uključujući otpornost na trošenje. Čestice stakla, ovisno o vrsti, variraju veličinom od 4 do 25 μm [14].

3.6 Stomatološko ljepilo

Stomatološko ljepilo, poznatije i pod nazivom stomatološki cement, služi za popravke i restauraciju zuba, uključujući povezivanje stranih ispuna s ostatkom zuba. Dijele se na privremena i trajna, no privremene su rijetko u upotrebi. Trajna stomatološka ljepila mogu biti stakleni ionomeri, cink oksidni eugenoli, cink fosfati i polikarboksilati. U pravilu se nanose u tankim slojevima, debljine 10-30 μm . Iako kod primjene modernih ispuna ljepila nisu nužna, ovaj rad će FEA analizom pokušati utvrditi poboljšavaju li svojstva zuba prilikom restauracije ispunom uz prethodno nanošenje stomatološkog ljepila. Slika 3.3 prikazuje aplikaciju stomatološkog ljepila u stvarnom kliničkom slučaju.



Slika 3.3: Nanošenje stomatološkog ljepila [23]

4. Numerička analiza

Numerička analiza je provedena pomoću programskog paketa Ansys Workbench 2023 R2 Student. Preduvjet FEA analizi u Ansysu preduvjet je kvalitetno obrađeni model (geometrija), obrađena u programskom paketu Autodesk Fusion 360 Education.

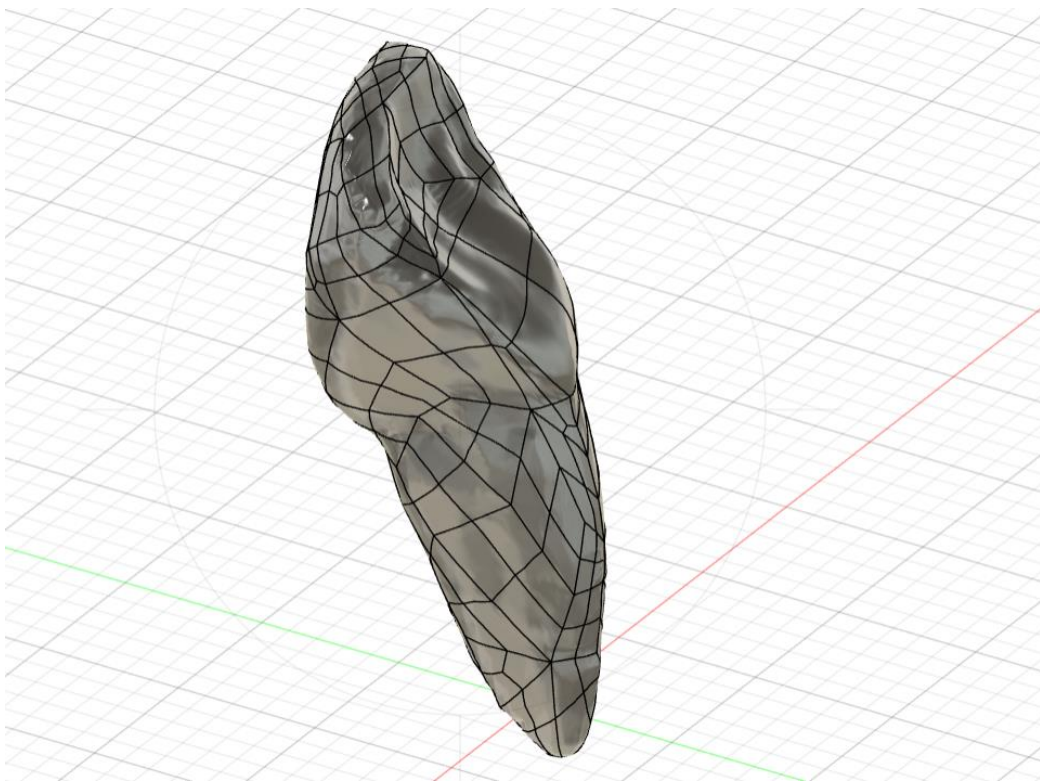
4.1 Autodesk Fusion 360 (Education)

Fusion 360 je proizvod tvrtke Autodesk, američke multinacionalne softverske korporacije koja se bavi proizvodnjom i podrškom za softverske pakete namijenjene za arhitekturu, strojarstvo, graditeljstvo, proizvodnju, medije, obuku (školovanje) i za industriju zabave. Tvrtke je osnovana 1982. [21], a danas je sjedište tvrtke u San Franciscu, u saveznoj državi Kalifornija. Autodesk je najpoznatiji po programskom paketu AutoCAD, koji je ujedno bio i prvi proizvod tvrtke Autodesk, pušten u prodaju u prosincu 1982.[21]. Autodesk Fusion 360 je trenutno jedini program na tržištu koji objedinjuje cijeli proces razvoja proizvoda, u jedinstvenu CAD/CAM/CAE platformu. Fusion 360 je jedan od prvih softverskih rješenja za strojarstvo čiji se rad temelji na platformi koja je u „oblaku“. Pojedine verzije Fusiona se mogu koristiti izravno kroz internetski pretraživač, bez potrebe instalacije programskog paketa na računalo. Fusion 360 se prvi puta pojavio na tržištu 2012., a razvijen je iz programa Inventor.

Fusion 360 ima mogućnosti 3D modeliranja, simulacije i dokumentacije potrebnih nacrti i modela. Uz to, posebne ekstenzije programa omogućuju dodatne značajke poput upravljanje i generiranje NC koda za strojnu obradu, alate za aditivnu proizvodnju (3D ispis), ali i za generiranje rendera, animaciju, generativni dizajn i sl. Iako je Fusion 360 široko rasprostranjen u inženjerskoj zajednici, ponajviše zbog *on-line* mogućnosti dijeljenja sadržaja unutar tima i istovremenog uređivanja istog modela, isti nije najviše korišten program. Najveći udio tržišta u području programskih alata za modeliranje u tom polju drži SolidWorks [22].

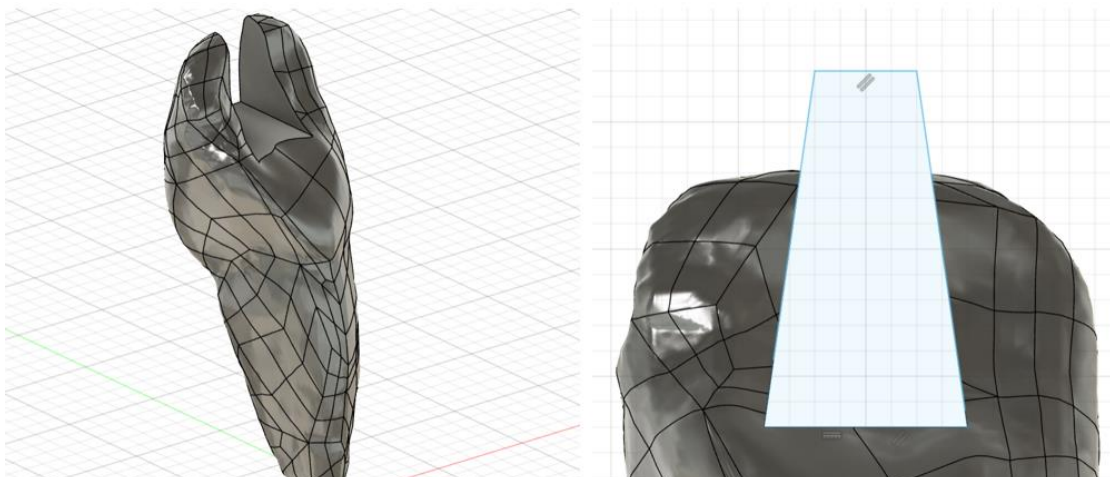
4.2 Model

Osnova FEA analize je model. U ovom slučaju je odabran model drugog gornjeg lijevog sjekutića, odnosno zub broj 22 po FDI metodi numeriranja zubi. Osnovna geometrija modela je dobivena CBTC snimanjem nakon čega je uz pomoć softvera za obradu podataka dobivena geometrija odgovarajuća za daljnju FEA analizu. Slika 4.1 prikazuje model zuba u programu Fusion 360.



Slika 4.1: Model zuba u programu Fusion 360

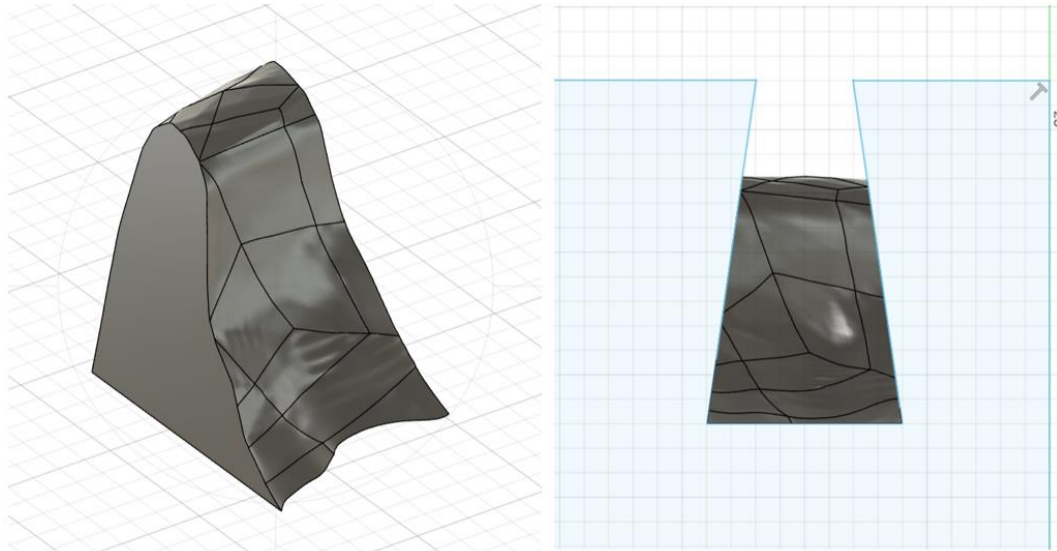
S obzirom na ciljeve ispitivanja, potrebno je bilo prilagoditi i urediti model na odgovarajući način. Ciljevi ispitivanja uključuju promatranje zdravog zuba te zuba s različitim ispunama kao i ispunama koje su fiksirane stomatološkim ljepilom. Kako bi se simulirala ispuna, zub je pri vrhu proizvoljno izrezan. Isto je napravljeno na način da je u 2D napravljen novi *sketch*, koji je oblika kakvog je ispuna. Potom je naredbom *extrude* isti *sketch* ekstrudiran odnosno opcijom *cut* je izrezan željeni dio iz zuba. S obzirom da je 2D *sketch* formiran u odnosu na 3D model na sredini zuba, korištena je opcija simetričnog ekstrudiranja u obje strane, proizvoljnog iznosa s obzirom da se koristi opcija *cut*. Na taj je način dobiven zub s otvorom koji simulira odstranjeni dio zuba zbog karijesa ili druge traume. Slika 4.2 prikazuje *sketch* i rezultat korištenja naredbe *cut*.



Slika 4.2: Model izrezanog dijela zuba i odgovarajući 2D sketch

Takav model je spremljen kao posebni model te se zatim prelazi na stvaranja modela ispune. S obzirom da ispuna mora biti identičnih dimenzija kao i izrezani dio na ostatku zuba, bilo je potrebno ponovo otvoriti cijeli model zuba, kopirati *sketch* iz prethodnog modela i prepraviti ga na način da se ovog puta ekstrudira ostatak zuba, osim ispune. Isto je napravljeno na način da je na *sketchu* obrisana gornja linija koja je zatvarala objekt te je konstruirana nova 2D geometrija koja okružuje cijeli zub. Na taj će način opcijom *extrude* i pod naredbom *cut* biti izrezani cijeli zub, osim predviđene ispune. U ovom je koraku iznimno važno ne pomicati model zuba kao niti *sketcha*, kako bi korak kasnije, u spajanju modela, bilo lakše povezati model u jednu cjelinu.

Slika 4.3 prikazuje *sketch* i odgovarajući dobiveni model. Nakon završenih operacija na modelu, isti je spremljen kao posebna datoteka. Na poslijetku su dobivene dvije datoteke – tijelo zuba s izrezanim dijelom za ispunu i sama ispunu.

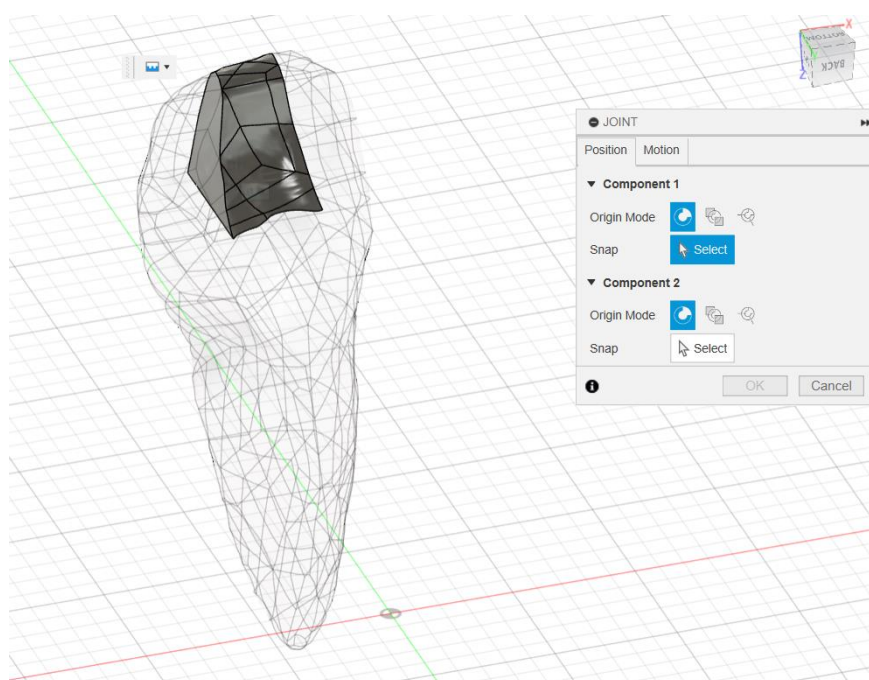


Slika 4.3: Model izrezane ispunu i odgovarajući sketch

Važno je naglasiti iz kojeg razloga je bilo potrebno rastaviti zub na dva dijela – na ispunu i ostatak zuba. Kako bi se u daljnjoj FEA analizi mogli definirati različiti materijali za zub i za ispunu, potrebno je rastaviti zub kako bi se u Ansys to prepoznao kao dvije različite geometrije, kojima je moguće dodijeliti različite materijale.

Slijedeći korak je spajanje dva stvorena dijela u jednu cjelinu zuba, spojene opcijom *rigid connection* kako bi se model kasnije u FEA analizi ponašao kao cjelina. Prvi je korak otvoriti novi *design* u koje je potrebno uvesti datoteku izrezanog zuba i ispunu. Ako nije mijenjana pozicija niti jednog od modela, dijelovi bi se trebali otvoriti na način da su u točnoj poziciji i da ih nije potrebno pomicati. Zatim je potrebno opcijom *joint* spojiti dijelove na način da se ponašaju kao jedna cjelina. Iako ovaj korak nije nužan jer se konekcije između dijelova mogu namjestiti i u Ansysu, odlučeno je da se one spoje već u Fusionu kako bi se izbjegle moguće greške tijekom numeričke analize.

Opcija *joint* se nalazi u odjeljku *assemble*. Prilikom klika na opciju potrebno je odabrati dvije komponente koje će biti spojene. U konkretnom slučaju odabrane su plohe na donjoj strani ispune odnosno na gornjoj strani izrezanog zuba. Teoretski gledano, to mogu biti bilo koje dvije plohe koje naliježu jedna na drugu, no iz estetskih razloga su odabrane donje plohe. Važno je naglasiti kako je s navedenom opcijom potrebno spojiti samo dvije plohe, dok se softver ostatak tretirati kao već spojene plohe. Slika 4.4 prikazuje opciju *joint*.



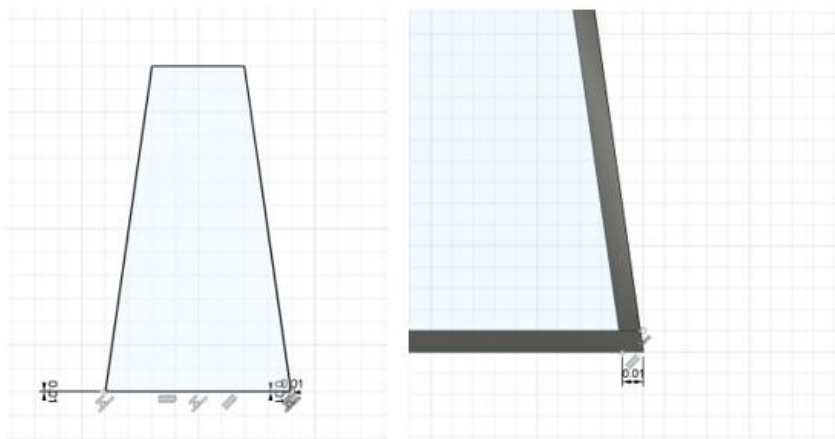
Slika 4.4: Opcija *joint* za spajanje dva modela u jedan funkcionalni model

Pod *Component 1* je odabrana donja ploha ispune, a za *Component 2* je odabrana gornja ploha izrezanog dijela zuba. Iako je softversko rješenje da se druga komponenta „sakrije“ kako bi se na aktualnoj mogla odabrati odgovarajuća ploha, isto ponekad ne funkcionira na navedeni način. Alternativa je odabrati model koji želimo sakriti u izborniku *Bodies*, zatim desni klik i *Hide Body*. Nakon što su odabrane obje plohe, potrebno je kliknuti na opciju *Motion* kako bi se odabrao *rigid joint*, odnosno da bi veza između dva modela bila čvrsti spoj, odnosno tretirana kao jedan funkcionalni model.

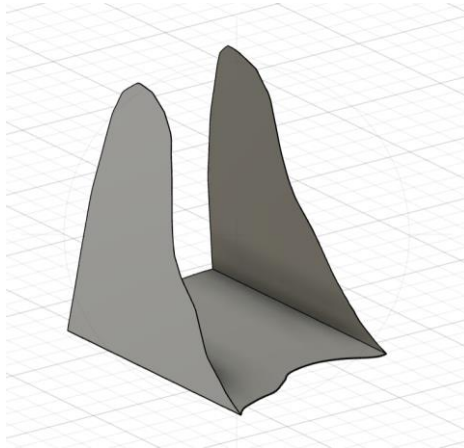
Time ja završeno modeliranje prvog modela koji će se koristiti u FEA analizi, a to je zub s ispunom bez sloja stomatološkog ljepila. Modeli su spremljeni u *step* formatu (.stp), koji je moguće uvesti u Ansys. Sljedeći korak je modeliranje modela sa slojem stomatološkog ljepila.

Sloj stomatološkog ljepila se nanosi u debljini od 10 μm , odnosno 0,01 mm [20]. Odlučeno je kao se model zuba s otvorom za ispunu neće mijenjati, već kako će se s modela ispune skinuti sloj od 10 μm , koji će se spojiti sa ispunom i zubom, na način da model bude sastavljen od tri dijela. Isto je napravljeno na način da je otvoren model ispune i napravljen novi *sketch*. *Sketch* je napravljen naredbom *offset* na način da su odabrani postojeći bridovi ruba ispune te su generirane nove linije koje su udaljene 0,01 mm od postojećih bridova. S obzirom da navedena naredba tvori samo linije, iste je potrebno ručno povezati kako bi linije tvorile zatvorenu cjelinu koju je moguće koristiti za opciju *extrude*, odnosno *cut*. Na taj je način stvorena ispuna koja je na mjestu spajanja sa zubom 10 μm manja od utora na ostatku zuba. Model je spremljen kao zasebni model.

Potom se pristupilo modeliranju sloja ljepila. Ponovo je otvoren model ispune te je kopiran *sketch* pomoću kojeg je formirana prethodna ispuna. *Sketch* je prilagođen na način da je transformiran tako da se naredbom *extrude*, odnosno *cut* sada izreže cijela ispuna osim sloja od 10 μm . Isto je napravljeno te je sloj ljepila spremljen kao zaseban model. Slika 4.5 prikazuje *sketch*, a 4.6 odgovarajući model kojim je dobiven model sloja ljepila.

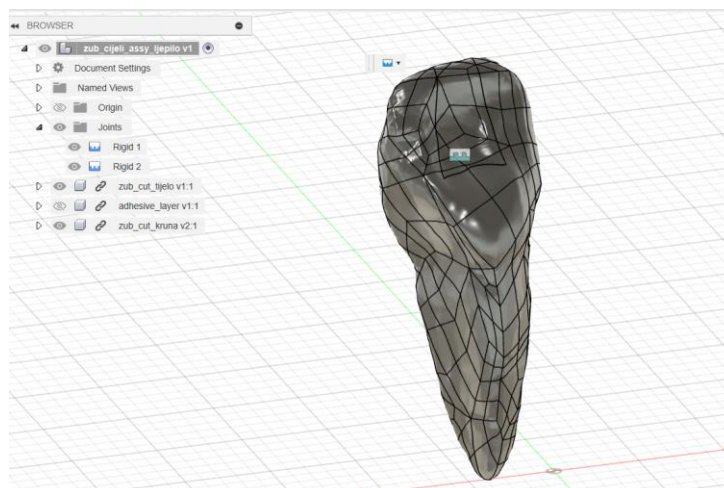


Slika 4.5: Sketch modela sloja ljepila



Slika 4.6: Model sloja ljepila

Po završenom modeliranju svih predviđenih dijelova modela zuba s ispunom i slojem ljepila, pristupilo se povezivanju modela u jednu funkcionalnu cjelinu. Ponovo je otvoren novi *design* u koji su uvezeni sva tri modela – zub s otvorom za ispunu, ispunu i sloj ljepila. I kod ovog modela je bilo važno ne pomicati model niti ga rotirati, kako bi prilikom otvaranja sva tri modela u jednom *designu* dijelovi došli točno na predviđeno mjesto. Kod ovog modela se to posebno ističe zbog sloja ljepila koji je debljine svega 0,01 mm, te je u Fusionu prikazan samo kao crta. Ovoga puta su napravljena dva spoja opcijom *joint*, spoj ispune i sloja ljepila te spoj tako povezanog sloja ljepila s ostatkom zuba. Slika 4.7 prikazuje povezani model, gdje je na lijevoj strani vidljivo kako je isti stvoren iz tri modela, te povezan opcijom *joint*. Takav model je spremljen kao poseban u .stp formatu, te je tima završeno modeliranje modela za FEA analizu.

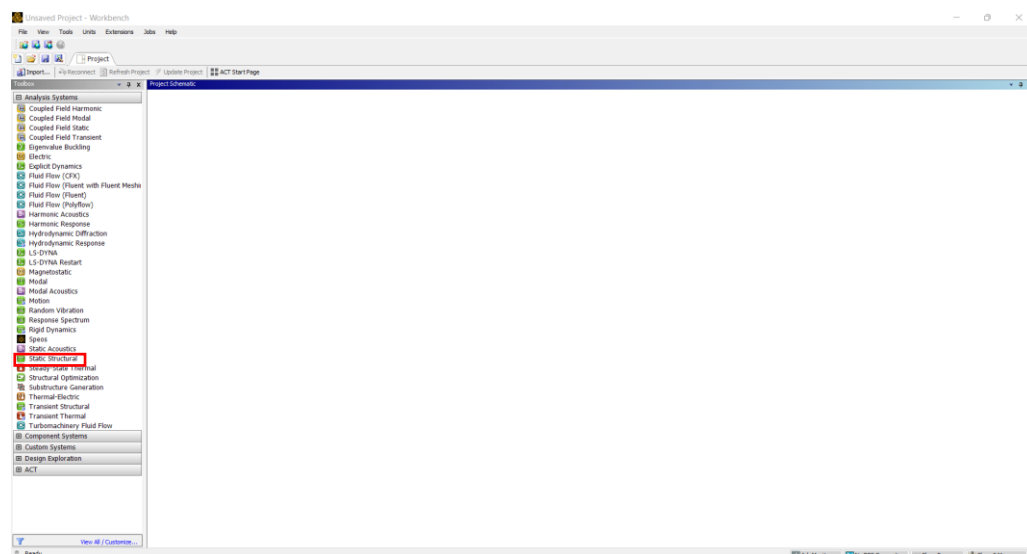


Slika 4.7: Završeni spojeni model koji se sastoji od izrezanog zuba, sloja ljepila i ispune

4.3 Ansys Workbench

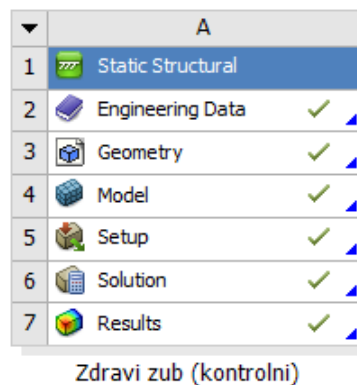
Za FEM analizu je korišten programski paket Ansys Workbench R2 Student. Isti program je moguće dobiti na korištenje besplatno u akademske svrhe, uz pojedina ograničenja poput broja konačnih elemenata i sl. Ansys je američka multinacionalna tvrtka koja se bavi razvojem softvera za CAE inženjerske simulacije, koje se koriste u svrhu dizajniranja, testiranja i uporabe. Tvrtka je osnovana 1970., da bi prvi softver za numeričku analizu, nazvan Ansys 2.0, na tržište izbacila i stavila u uporabu 1971. godine [24]. Tijekom godina Ansys se razvijao, ponajviše akvizicijama konkurentnih tvrtki koje su bile naprednije u razvoju programskih paketa za inženjerske simulacije. Danas je Ansys jedan od najrazvijenijih inženjerskih alata, a omogućuje analize iz područja čvrstoće, žilavosti, protoka fluida, elektromagnetizma i sl. Ansys omogućuje realistično testiranje proizvoda kroz jedan od dostupnih modula, bez potrebe za izradom prototipova i testiranja u stvarnim uvjetima, što nerijetko može biti skupo i dugotrajno. Isto je omogućeno značajkom Ansysa koja omogućuje rad u pred procesoru, procesoru i post procesoru [24].

Ansys simulacije se izvode preko sučelja Ansys Workbench. Uobičajena je praksa model rastaviti na manje dijelove te provesti jednu od odgovarajućih Ansys analiza na istima, prije analize cijelog sklopa. Ovaj rad obuhvaća analizu zuba statičkom analizom (*static structural*), koje je jedan od modula Ansysovog Workbencha. Slika 4.8 prikazuje sučelje Ansys Workbencha uz označeni dio statičke analize.



Slika 4.8: Sučelje Ansys Workbencha s označenom karticom statičke analize

Klikom na *Static structural* otvara se kartica postavki statičke strukturne analize. Kartica sadrži sve važne značajke modela na kojem se provodi FEA analiza. Kartica na vrhu sadrži slovnu oznaku kartice. S obzirom da je moguće otvoriti više analiza istovremeno u istom Workbenchu, slovne oznake služe za označavanje kojim redoslijedom su otvorene koje kartice. Odmah ispod slovne oznake se nalazi vrsta analize, u konkretnom slučaju *Static Structural*. Zatim slijede *tabovi* za *Engineering Data*, *Geometry*, *Model*, *Setup*, *Solution* i *Results*. Ispod navedenog se nalazi polje za unos teksta, u koje je moguće unijeti naziv konkretne analize. Slika 4.9 prikazuje karticu postavki statičke strukturne analize.



Slika 4.9: Kartica postavki statičke strukturne analize

Engineering Data – Inženjerski podatci

Postavke vezane uz *Engineering Data* se uglavnom odnose na svojstva materijala. Pri tome, moguće je učitati neki od materijala iz dostupnih (*Material Library*), ili je moguće dodati vlastiti materijal koji je potrebno okarakterizirati na način kojim će podatci odgovarati FEA obradi podataka. S obzirom na prirodu analize koja se provodi, materijalu se mogu dodati svojstva poput linearne elastičnosti, plastičnosti, svojstva puzanja, električke vodljivosti, koeficijenti toplinske vodljivosti i sl.

Geometry – Geometrija

Postoje četiri načina generiranja ili uvoza geometrije u Ansys R2 2023. Onaj najjednostavnija je koristiti neke od drugih programskih paketa za 3D modeliranje i napraviti uvoz modela. Isto je moguće desnim klikom na *tab Geometry*, i odabir opcije *Import Geometry*. Pri tome je važno da je model koji smo pripremili u nekom od odgovarajućih formata, u konkretnom slučaju *step* datoteka, odnosno *.stp*.

Step datoteka je standard za razmjenu datoteka, a standardiziran je normom ISO 10303 [25]. Navedeni format je uobičajeni format datoteke za 3D modeliranje, aditivnu proizvodnju ali i proizvodnju odvajanjem čestica. Gotovo svi današnji moderni programi za 3D modeliranje imaju mogućnost generiranja ili uvoza (učitavanja) *step* datoteka, što ovaj standard datoteka čini iznimno važnim.

Ako je model u odgovarajućem formatu i ako je model ispravan, pored naziva *Geometry* bi se trebala pojaviti zelena kvačica. Nakon što je model uvezen, moguće ga je dodatno urediti jednim od tri alata integrirana u Ansys: *Discovery*, *SpaceClaim* i *DesignModeler*. Iskustveno govoreći, navedeni programi su dobar alat za jednostavnije konstrukcije ili minimalne popravke ili unaprijeđena postojećeg modela, no za kompliciranije modele nisu najbolje rješenja. Općenito, *Discovery*, *SpaceClaim* i *Design Modeler* su programi koji pružaju izradu 3D geometrije, obradu postojećih modela kao i definiranje pojedinih točaka geometrije koje su važne kasnije tijekom FEA analize.

Model

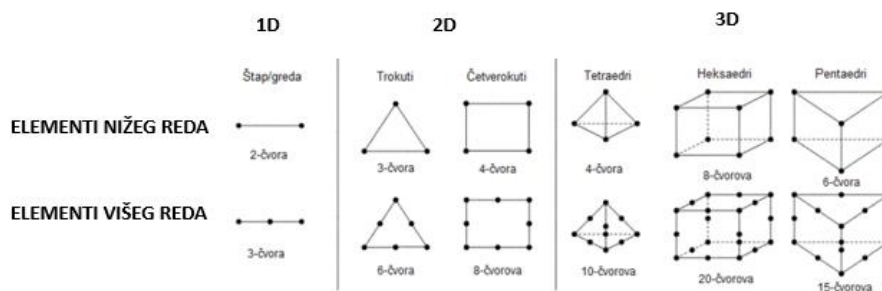
Model je *tab* koji otvara Ansys Mechanical. Prije otvaranja istog, važno je da svaki od prethodnih *tabova* ima zelenu kvačicu, odnosno da je svaki od prethodnih zadataka ispravno definiran i postavljen. Samo otvaranje Mechanicala može potrajati, ovisno o kompleksnosti modela i raspoloživim performansama računala.

U modelu je potrebno definirati nekoliko stavaka. Pod *Geometry Imports* je moguće vidjeti koji modeli su uvezeni, a pod *Geometry* svi modeli, uključujući uvezene i izrađene u jednom od alata u Ansysu. U istom odjeljku je moguće pojedinom elementu modela dodijeliti svojstva poput materijala, temperature i sl. Zatim pod *Materials* je moguće vidjeti koji materijali su dodijeljeni kojem dijelu modela. *Coordinate Systems* prikazuje koordinatne sustave koji se nalaze u modelu. U početku to je samo globalni koordinatni sustav, ali je također moguće dodati i nove, posebice ako je potrebno pozicionirati sile s različitim hvatištima. Konačno, posljednji, a ujedno i najvažniji, je *Mesh*, odnosno kreiranje mreže konačnih elemenata prema kojima će biti provedena FEA analiza. O tipu, veličini i rasporedu konačnih elemenata u mreži posljedično ovise i rezultati analize.

4.3.1 Mreža konačnih elemenata

Govoreći o konačnim elementima, teorijski se oni dijele na 1D, 2D i 3D elemente. 1D su osnovni štapni elementi koji, ovisno o izvedbi, mogu imati dva ili tri čvora. 2D elementi su površinski elementi, a u osnovnim izvedbama mogu biti trokuti i četverokuti. U primjeni su najčešće trokutasti elementi sa tri čvora ili šest čvorova. S obzirom na izvedbe s više čvorova, 2D elementi mogu tvoriti i razne nepravilne površinske oblike. 2D elementi se najčešće koriste u svrhu rješavanja 2D problema elastičnosti, s obzirom na to da u FEA analizi u obzir uzimaju naprezanje i deformaciju ravnine. Konačno, 3D elementi se koriste za diskretiziranje volumena, odnosno 3D elemenata. Istu su izvedeni iz 2D elemenata, a koriste se u slučajevima kada je potrebno dobiti preciznije rezultate. Valja naglasiti kako točnost i preciznost rezultata posljedično ovisi o broju čvorova – što je broj čvorova veći, to su rezultati precizniji. No, potrebno je donijeti odluku u kojim je slučajevima poželjan veći broj čvorova a u kojima ne. S obzirom na to da broj čvorova utječe i na vrijeme obrade modela, odnosno vrijeme potrebno za računanje rješenja, preporučljivo je napraviti gušću mrežu u samo određenim slučajevima. Primjerice, kod naglih promjena oblika, u kutovima, na rubovima modela ili na mjestima gdje je potrebno dobiti točnije, odnosno preciznije rezultate. Isto je moguće desnim klikom na *Mesh* i odabirom opcije *Sizing*. U opciji *Sizing* je moguće odabrati sve ili pojedine elemente modela oko kojih želimo promijeniti veličinu konačnih elemenata. U polju niže je moguće odabrati veličinu konačnog elementa, u mjernoj jedinici u kojoj je trenutno namješten program.

Zaključno govoreći o konačnim elementima, možemo ih podijeliti na elemente višeg i nižeg reda, pri čemu je razlika u tome što elementi višeg reda imaju među čvor, a elementi nižeg reda nemaju. Elementi višeg reda se ističu po boljoj preciznosti, dok su elementi nižeg reda poželjniji u jednostavnijim slučajevima gdje je mreža jednostavnija, što na posljetku omogućuje brže dobivanje rješenja. Slika 4.10 prikazuje pregled konačnih elemenata.



Slika 4.10: Osnovni pregled konačnih elemenata [26]

4.3.2 Metoda konačnih elemenata

Teorija metode konačnih elemenata proizlazi iz problema analize stvarnog objekta koji ima beskonačno mnogo čestica, koje se mogu kretati prema beskonačnom broju stupnjeva slobode gibanja. U takvim slučajevima numeričke metode ne mogu poslužiti svrsi, već se objekt svodi na konačne elemente (postupak diskretizacije), s konačnim brojem stupnjeva slobode gibanja. U numeričkim proračunima se za svaki konačni element pretpostavlja rješenje diferencijalne jednačbe u obliku interpolacijskih funkcija i zavisnih varijabli u čvorovima [27].

Proračun metode konačnih elemenata je moguće podijeliti u tri faze. Prva je formacija globalne matrice krutosti (\mathbf{K}), te određivanje globalnih vektora pomaka i opterećenja. S obzirom da je u ovom radu FEA analiza provedena s 3D elementima, izvod lokalne matrice krutosti glasi:

Jednadžba 1: Izvod lokalne matrice krutosti 3D konačnog elementa [27]

$$\mathbf{K} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV_e$$

Slijedeći korak je rješavanje linearnog sustava od n jednačbi s n nepoznanica:

Jednadžba 2: Rješavanje linearnog sustava od n jednačbi s n nepoznanica [27]

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \times \mathbf{U}$$

Da bi ovakav sustav bilo moguće riješiti potrebno je napraviti inverziju matrice krutosti iz prethodne formule i pomoću poznatog vektora sile (F) odrediti pomake (U) koji predstavljaju translacije i rotacije svih čvorova konstrukcije. Rezultat su i nepoznate reakcije oslonaca. Treća i posljednja faza je izračun svih potrebnih parametara (deformacija, naprezanje, temperatura i sl.), a koje se temelje na dobivenim pomacima čvorova [27]. Računalna FEA analiza se temelji na ovakvom postupku rješavanja metodom konačnih elemenata.

Setup – Postavljanje

Slijedeći korak u postavljanje FEA analize je postavljanje parametara koji utječu na model. Konkretno, važno je unijeti minimalno rubne uvjete i neke od opterećenja koja će djelovati na model. Ovdje je važno prepoznati kakvi će rubni uvjeti vladati na model u praksi te ih primijeniti na računalni model. U statičkoj strukturnoj analizi važno je da je jedan od dijelova modela uklješten, odnosno da je rubni uvjet na tom dijelu *fixed support*. Isto se dodaje desnim klikom na *Static Structural* → *Insert* → *Fixed support*. Prilikom pozicioniranja uklještenja možemo na modelu odabrati čvor, liniju ili površinu, ovisno o uvjetima i zahtjevima modela.

Uz rubne uvjete, potrebno je dodati i odgovarajuća opterećenja, koja mogu biti momenti, sile, pritisci i sl. Isto je također moguće pozicionirati bilo gdje na modelu, odnosno na čvoru, liniji ili površini konačnog elementa. Prilikom postavljanja modela, rubnih uvjeta i opterećenja, poželjno je kliknuti na naredbu *Solve* kako bi vidjeli ako je model ispravno i na odgovarajući način definiran. Ukoliko je to slučaj, pored svakog od stavki u lijevom prozoru programa će se pojaviti zelena kvačica, u suprotnom, crveni X.

***Solution & Results* – Rješenje i rezultati**

Odjeljak rješenja i rezultata od korisnika traži da definira koje od rezultata je potrebno računati i prikazati. Za jednostavnije statičke strukturne analize, najčešće je dovoljno dodati ukupnu deformaciju i ukupno naprezanje (po von Misesu). Općenito, bilo koji od parametara rezultata je moguće dodati desnim klikom na *Solution* → *Insert*. Klikom na tipku *Solve* program izračunava rješenja. Ovdje je važno u naredbenom prozoru *Solve* definirati s koliko procesorskih će računalo obrađivati model, o čemu ovisi vrijeme rješenja analize. Ukoliko je sve ispravno uneseno i definirano, pored pojedinih rješenja se prikazuje zelena kvačica te je klikom na rješenje moguće vidjeti isto uz simulaciju. Rješenje je moguće preuzeti i u tekstualnom obliku, odnosno u obliku Ansysovog izvještaja.

5. Numerička analiza zuba

Nakon što je definiran model, objašnjeno funkcioniranje programskog paketa Ansys i same metode konačnih elemenata, prelazimo na sam programski zadatak odnosno konkretnu FEA analizu zuba s različitim ispunama, pod utjecajem različitih sila.

Analize su definirane po uzoru na provedena istraživanja [28][29][30], a s ciljem razmatranja kako se ponašaju *inlay* ispune od različitih materijala u uvjetima i pod djelovanjem sila različitih iznosa i različitih hvatišta, sa i bez sloja stomatološkog ljepila. Pojednostavljeno, cilj je prikazati kako pojedina vrsta ispune utječe na naprezanja u zubu, od starijih materijala ispuna (poput amalgama), do novijih (*Equia Forte*).

Uz to, cilj je razmotriti kakav je utjecaj stomatološkog ljepila na naprezanja u zubu, a kao dodatnog sloja između ispune i zuba.

Za osnovni model zuba je uzeta srednja vrijednost materijala zuba, pod time uključujući modul elastičnosti i Poissonov koeficijent, a ta vrijednost pokriva i dentin i caklinu. Uzimajući isto u obzir, dentin je mekši od cakline, a pulpa i cement ne utječu na FEA analizu, odnosno na mehanička svojstva zuba.

5.1 Vrste analiza

Ukupno je definirano 7 vrsta analiza, koji su tablično prikazani u tablici 2:

Tablica 2: Prikaz programskih zadataka

| Broj | Osnova modela | Sloj ljepila | Materijal ispune | Iznos sile [N] | Orijentacija sile |
|------------------|---------------|--------------|------------------|----------------|-------------------|
| Analiza 1 | | | | | |
| 1.1 | Zdravi zub | NE | / | 100 | Vertikalno |
| Analiza 2 | | | | | |
| 2.1 | Izrezani zub | NE | Amalgam | 100 | Vertikalno |
| 2.2 | Izrezani zub | NE | Amalgam | 400 | 35° |
| 2.3 | Izrezani zub | NE | Amalgam | 400 | 45° |
| Analiza 3 | | | | | |
| 3.1 | Izrezani zub | NE | KS | 100 | Vertikalno |
| 3.2 | Izrezani zub | NE | KS | 400 | 35° |
| 3.3 | Izrezani zub | NE | KS | 400 | 45° |
| Analiza 4 | | | | | |
| 4.1 | Izrezani zub | NE | EQ | 100 | Vertikalno |
| 4.2 | Izrezani zub | NE | EQ | 400 | 35° |
| 4.3 | Izrezani zub | NE | EQ | 400 | 45° |
| Analiza 5 | | | | | |
| 5.1 | Izrezani zub | DA | Amalgam | 100 | Vertikalno |
| 5.2 | Izrezani zub | DA | Amalgam | 400 | 35° |
| 5.3 | Izrezani zub | DA | Amalgam | 400 | 45° |
| Analiza 6 | | | | | |
| 6.1 | Izrezani zub | DA | KS | 100 | Vertikalno |
| 6.2 | Izrezani zub | DA | KS | 400 | 35° |
| 6.3 | Izrezani zub | DA | KS | 400 | 45° |
| Analiza 7 | | | | | |
| 7.1 | Izrezani zub | DA | EQ | 100 | Vertikalno |
| 7.2 | Izrezani zub | DA | EQ | 400 | 35° |
| 7.3 | Izrezani zub | DA | EQ | 400 | 45° |

5.2 Svojstva materijala

Svojstva materijala kojim su definirani modeli su prikazana u tablici 3.

Tablica 3: Prikaz svojstva materijala

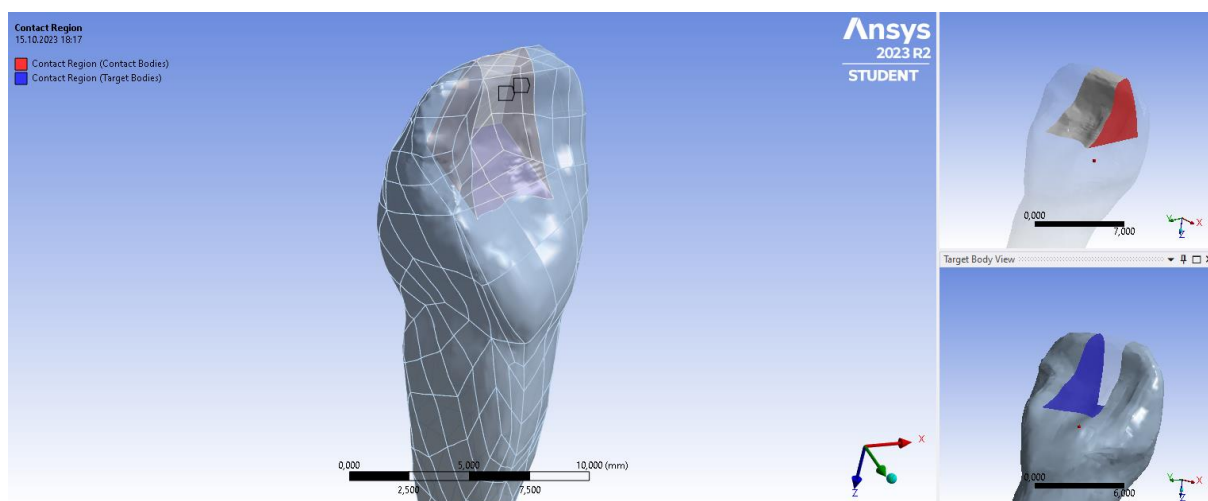
| Materijal | Youngov modul elastičnosti, E , MPa | Poissonov koeficijent, ν , - |
|-----------------------|--|-------------------------------------|
| Dentin | 18600 | 0.31 |
| Amalgam | 48300 | 0.35 |
| Kompozitna smola (KS) | 16600 | 0.33 |
| Equia Forte (EQ) | 13200 | 0.3 |
| Stomatološko ljepilo | 4500 | 0.3 |

Definiranje materijala u Ansysu

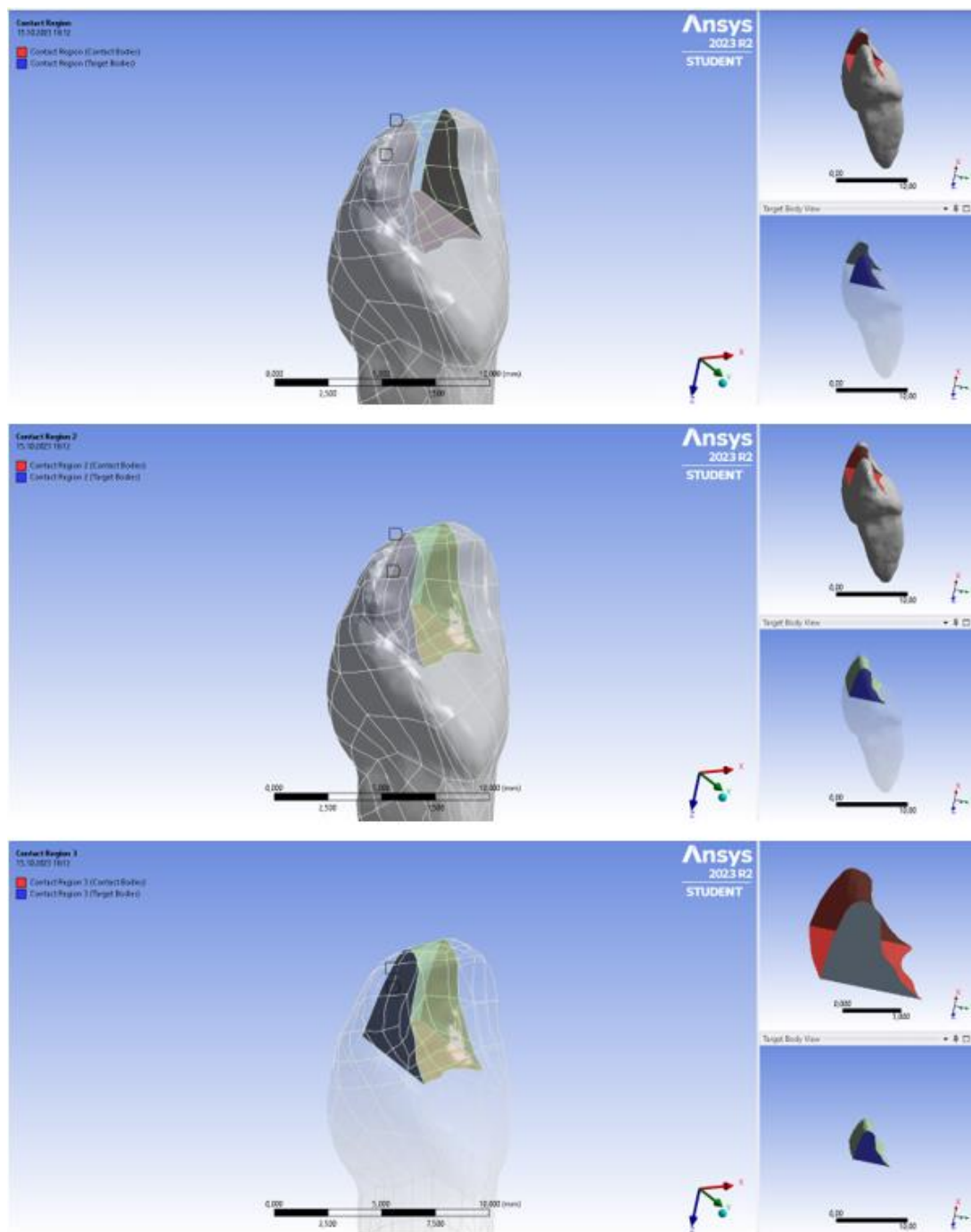
S obzirom da u knjižnici materijala Ansysa nije bilo bioloških materijala potrebnih za analizu, uneseni su ručno.

5.3 Definiranje geometrije i rubnih uvjeta kontakata

Uvezena je geometrija za svaki pojedini zadatak. S obzirom da su u Fusionu 360 definirane plohe spajanja i da su iste spojene opcijom *rigid connection*, otvaranjem modela u Ansysu nije bilo potrebno dodatno raditi spajanja, već u odjeljku *Connections* samo provjeriti odgovarajuće spojeve. Spojevi pojedinih komponenti modela su prikazani na slikama 5.6 i 5.7. Slika 5.6 prikazuje spojeve modela bez sloja ljepila, a 5.7 komponente sa slojem ljepila.



Slika 5.1: Prikaz spojeva modela bez sloja stomatološkog ljepila

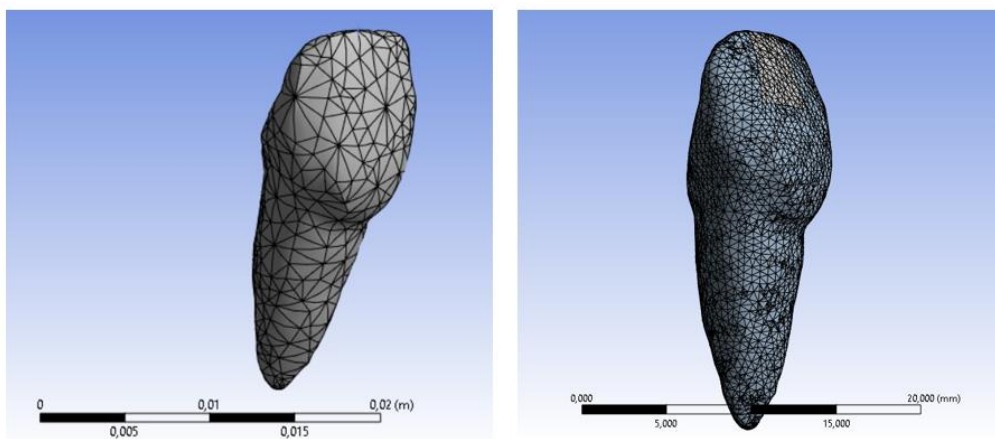


Slika 5.2: Prikaz spojeva modela sa slojem stomatološkog ljepila

Da bi geometrija bila definirana, potrebno je pojedinoj komponenti dodijeliti materijal, sukladno programskom zadatku. Tako je u svim modelima tijelu zuba dodijeljen materijal dentin, u svim zadacima gdje postoji je sloju ljepila dodan materijal ljepilo, a materijal ispune se mijenjao sukladno zadatku, od amalgama, kompozitne smole i *Equie Forte*.

5.4 Definiranje mreže

Slijedeći korak je definiranje mreže. Prije detaljnije obrade mreže generirana je automatski napravljena mreža (desni klik na *Mesh* → *Sizing*). S obzirom da automatski napravljena mreža nije imala svojstva kojim bi pružila precizne rezultate analize, opcijom *Sizing* je konačni element smanjen na 0,5 mm. Time su oblikovani konačni elementi tetraedara, a mreža je kreirana automatski, što ju čini nestrukturiranom. Slika 5.8 prikazuje usporedbu mreže prije i nakon korištenja opcije *Sizing*. Konačna mreža koristi tetraedarske konačne elemente, s 21522 elementa i 37393 čvora.

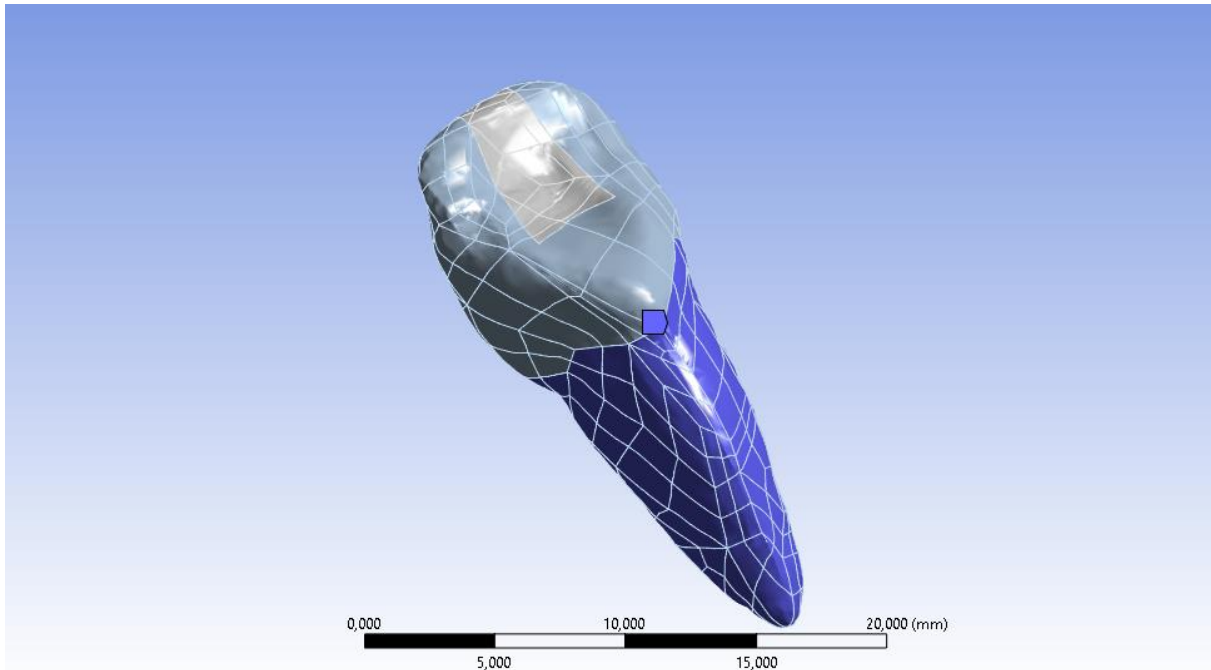


Slika 5.3: Usporedba mreže prije (lijevo) i nakon (desno) korištenja opcije *Sizing*

5.5 Definiranje rubnih uvjeta opterećenja

Zatim je potrebno definirati rubne uvjete. S obzirom da je korijen zuba za sve zadatke jednak, rubni uvjet uklještenja je za svaki pojedini zadatak isti. Ovdje je za rubni uvjet zadan *Fixed Support*, odnosno uklještenje koje se proteže od vrha korijena zuba do približne linije gingive. Za svaki model je napravljen isti rubni uvjet uklještenja. Za odabir elemenata je uzeta opcija odabira plohe te je označen onaj dio zuba koji je prekriven gingivom. Kontrola da je svaki model označen na isti način je broj 2D elemenata kojim je definirano uklještenje, a to je 154 plohe. U konkretnom slučaju broj ploha kojima je definirano uklještenje niti nije presudan, uzevši u obzir da je predmet rezultata analize vrh zuba.

Iz tog razloga je, teorijski, bilo dovoljno označiti jednu od ploha na korijenu zuba te bi rezultati bili isti. Ipak, iz razloga usporedbe različitih modela pažnja je stavljena na to da rubni uvjet uklještenja na svakom od modela bude identičan. Slika 5.9 prikazuje postavljeni rubni uvjet uklještenja.

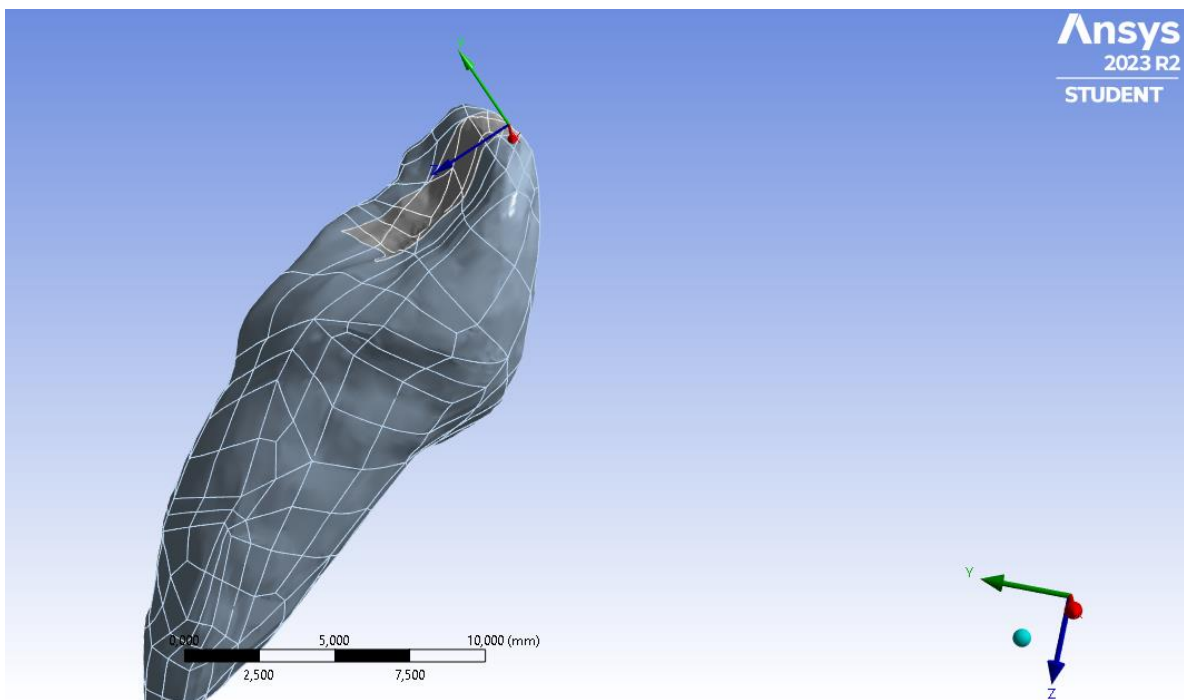


Slika 5.4: Prikaz postavljenog rubnog uvjeta uklještenja (Fixes Support)

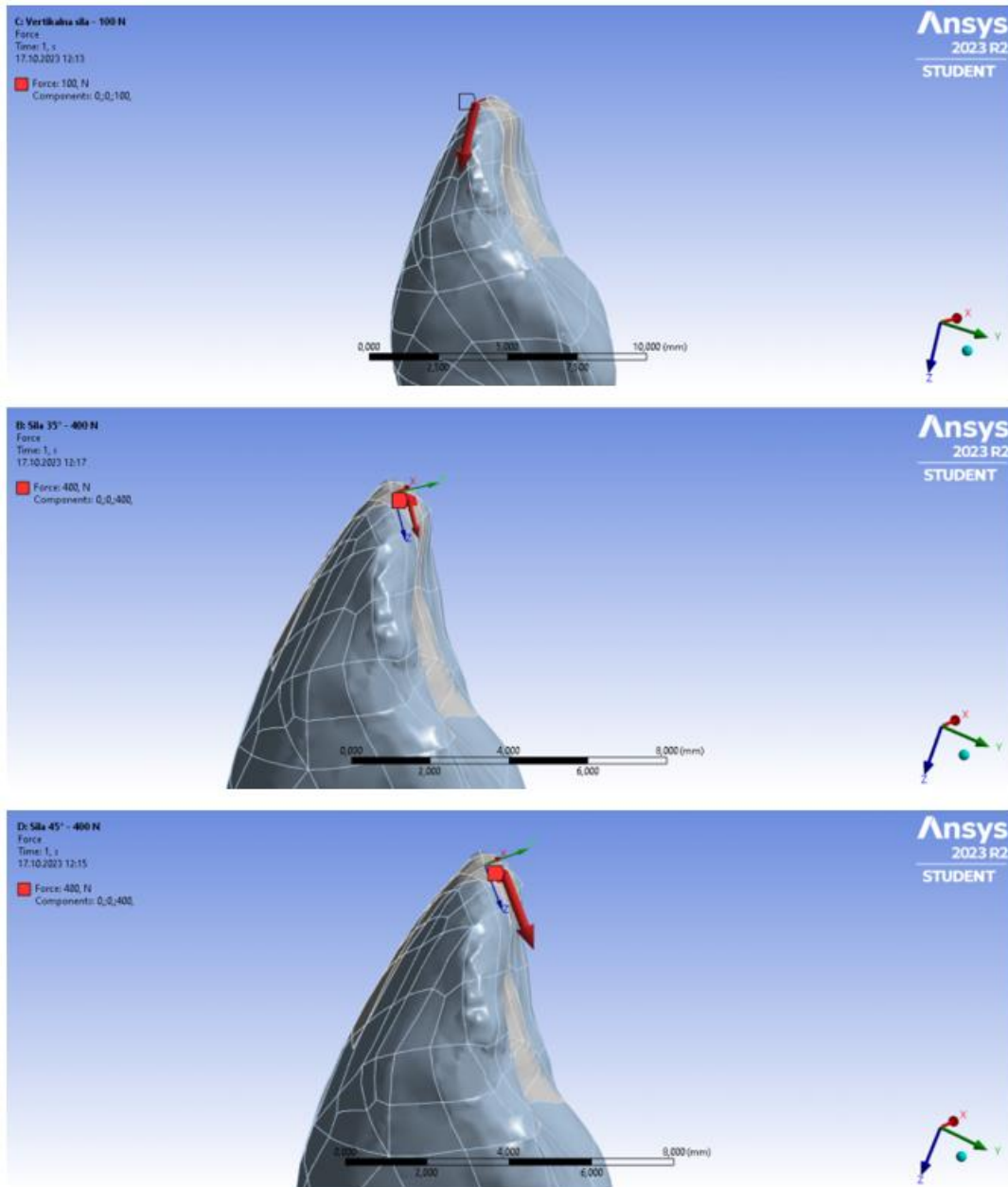
Nakon postavljenog rubnog uvjeta uklještenja, potrebno je postaviti rubne uvjete sila. Predmet istraživanja i analize su tri sile u različitim hvatištima – **vertikalna sila** koja djeluje na vrh zuba, pod kutom od 90° prema vrhu korijena, **sila pod kutom od 35°** koje je pomaknuta za 35° od vertikalne linije te **sila pod kutom od 45°** koja je pomaknuta za 45° od vertikalne linije. Postoje razni načini za pomicanje sile za određeni kut, no u ovom radu je korišten način ubacivanja novog koordinatnog sustava. Sila koje djeluje na vertikalnoj liniji je dodana na jednostavan način. Kao ishodište je odabran čvor na vrhu zuba (isti čvor za sva sile u svim modelima), te s obzirom da je zub pozicioniran na način da vertikalna linija leži u istoj ravnini sa Z osi, sila je definirana pomoću komponenti, odnosno iznos u po svakoj komponenti je nula, osim po Z osi gdje iznos 100 N.

Sile koje djeluju na 35° odnosno 45° u odnosu na vertikalnu liniju su dodane na način da je kreiran novi koordinatni sustav. Isto je napravljeno na način da je na *tabu* *Coordinate System* kliknut desni klik \rightarrow *Insert* \rightarrow *Coordinate System*. Za ishodište je odabran isti onaj čvor koji je ishodište sile koja djeluje na vertikalnoj liniji, u smjeru osi Z. Zatim je opcijom *Rotate*, cijeli koordinatni sustav rotiran oko osi X za 35° i 45° . Iste sile bi trebale imitirati sile koje djeluju na zub prilikom zagriža hrane. Slika 5.10 prikazuje položaj novog koordinatnog sustava.

Kada se kreirala sila koja djeluje pod kutom, u *tabu* definiranja sile je umjesto *Global Coordinate System*, odabran novi koordinatni sustav, te je sila ponovo definirane prema komponentama koordinatnog sustava – u svim smjerovima nula osim po smjeru osi z, 400N. Slika 5.11 prikazuje pregled hvatišta (smjerova) sila.



Slika 5.5: Prikaz novog koordinatnog sustava na vrhu zuba, rotiranog 45° u odnosu na vertikalnu liniju



Slika 5.6: Pregled hvatišta (smjerova) sila

Time je završeno definiranje modela, geometrije, materijala i rubnih uvjeta. U svrhu izbjegavanja grešaka u rezultatima, prije definiranja izlaznih parametara, odnosno rezultata, klikom na *Solve* je provjereno ako je sve definirano ispravno.

U području rezultata su definirane izlazne varijable koje su potrebne za analizu, a to su ukupna deformacija i ukupno naprezanje (von Misses).

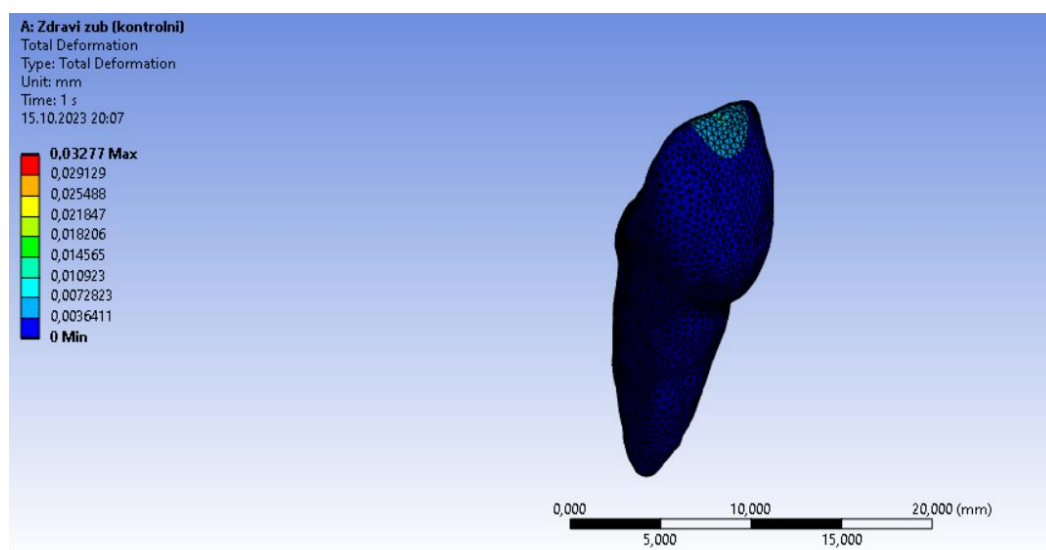
6. Rezultati i diskusija

Analiza i programski zadatci su zamišljeni na način da analiziraju utjecaj materijala ispuna na opterećenja i deformacije na zubu, kao i utjecaj sloja ljepila na opterećenja i deformacije. Stoga su rezultati oblikovani u tri osnovne usporedbe. Prva usporedba analizira utjecaj materijala ispune na različite sile, dok druga analizira iste materijale ispuna ali uz dodatak sloja ljepila. Treća usporedba obrađuje usporedbu pojedinih rezultata naprezanja opterećenja sa i bez sloja ljepila.

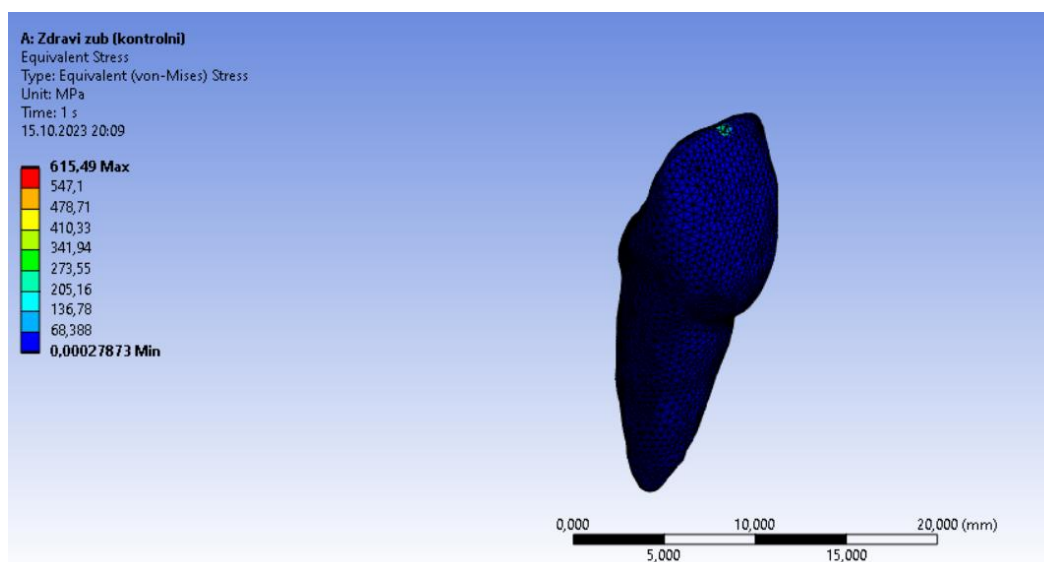
Prethodno opisanim analizama i usporedbama, bit će izneseni pojedinačni rezultati svake od ranije navedenih analiza.

ANALIZA 1

Prva analiza je zamišljena kao kontrolna, odnosno promatranje modela zdravog zuba (bez ispune) pod djelovanjem sile na vertikalnoj ravnini u iznosu 100N. Ukupni pomak iznosi 0.03277 mm, dok maksimalno von Mises opterećenje iznosi 615.49 MPa. Slike 6.1 i 6.2 prikazuju grafičke rezultate deformacije i naprezanja.



Slika 6.1: Grafički prikaz ukupnog pomaka, analiza 1



Slika 6.2: Grafički prikaz maksimalnog napreznja (von Misses), zadatak 1

ANALIZA 2

Druga analiza uspoređuje djelovanje sila s amalgamskom ispunom. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.0087339 mm, a ukupno napreznje 180.49 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.07847 mm, a najveće napreznje 534.20 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.06978 mm, a najveće napreznje 883.13 MPa. Prilog 1 prikazuje grafičke rezultate analize 2.

ANALIZA 3

Treća analiza uspoređuje djelovanje sila s ispunom od kompozitne smole. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.015578 mm, a ukupno napreznje 179.28 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.11913 mm, a najveće napreznje 534.66 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.12917 mm, a najveće napreznje 903.52 MPa. Prilog 2 prikazuje grafičke rezultate analize 3.

ANALIZA 4

Četvrta analiza uspoređuje djelovanje sila s ispunom od *Equiae Forte*. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.018039 mm, a ukupno naprezanje 179.96 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.13197 mm, a najveće naprezanje 538.77 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.1481 mm, a najveće naprezanje 915.36 MPa. Prilog 3 prikazuje grafičke rezultate analize 4.

ANALIZA 5

Peta analiza uspoređuje djelovanje sila s ispunom od amalgama, uz dodatak stomatološkog ljepila. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.0087283 mm, a ukupno naprezanje 160.60 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.035804 mm, a najveće naprezanje 336.26 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.52445 mm, a najveće naprezanje 309.47 MPa. Prilog 4 prikazuje grafičke rezultate analize 5.

ANALIZA 6

Šesta analiza uspoređuje djelovanje sila s ispunom od kompozitne smole, uz dodatak stomatološkog ljepila. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.015559 mm, a ukupno naprezanje 158.02 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.060639 mm, a najveće naprezanje 338.17 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.086883 mm, a najveće naprezanje 307.16 MPa. Prilog 5 prikazuje grafičke rezultate analize 6.

ANALIZA 7

Sedmi zadatak uspoređuje djelovanje sila s ispunom od *Equie Forte*, uz dodatak stomatološkog ljepljiva. Sile djeluju u smjeru vertikalne linije (osi Z), pod kutom od 35° i 45°. Ukupni pomak pod djelovanjem vertikalne sile od 100 N iznosi 0.018011 mm, a ukupno naprezanje 157.89 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 35° ukupni pomak iznosi 0.068545 mm, a najveće naprezanje 340.01 MPa. Pod djelovanjem sile od 400 N, pod kutom od 45° ukupni pomak iznosi 0.097474 mm, a najveće naprezanje 306.75 MPa. Prilog 6 prikazuje grafičke rezultate analize 7.

Tablica 4: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile, bez sloja stomatološkog ljepljiva

| Sila | Materijal | Ukupni pomak, mm | Maksimalno naprezanje, MPa |
|------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| 100 N, vertikalno djelovanje | Amalgam | 0,008734 | 180,49 |
| | Kompozitna smola | 0,015578 | 179,28 |
| | Equia Forte | 0,018039 | 179,96 |
| 400 N, djelovanje pod 35° | Amalgam | 0,078470 | 534,20 |
| | Kompozitna smola | 0,119130 | 534,66 |
| | Equia Forte | 0,131970 | 538,77 |
| 400 N, djelovanje pod 45° | Amalgam | 0,069780 | 883,13 |
| | Kompozitna smola | 0,129170 | 903,52 |
| | Equia Forte | 0,148100 | 915,52 |

Tablica 5: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile, sa dodanim slojem stomatološkog ljepila

| Sila | Materijal | Ukupni pomak, mm | Maksimalno naprezanje, MPa |
|------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| 100 N, vertikalno djelovanje | Amalgam | 0,008728 | 160,60 |
| | Kompozitna smola | 0,015559 | 158,02 |
| | Equia Forte | 0,018011 | 157,02 |
| 400 N, djelovanje pod 35° | Amalgam | 0,035804 | 336,26 |
| | Kompozitna smola | 0,060639 | 338,17 |
| | Equia Forte | 0,068545 | 340,17 |
| 400 N, djelovanje pod 45° | Amalgam | 0,052445 | 309,47 |
| | Kompozitna smola | 0,086883 | 307,16 |
| | Equia Forte | 0,097474 | 306,75 |

Slijedeći je prikaz kombiniranih rezultata, odnosno usporedba rezultata maksimalne deformacije i maksimalnog naprezanja na sve sile i sve materijale, usporedno sa i bez dodanog sloja stomatološkog ljepila. Navedeni rezultati su prikazani u tablici 6.

Tablica 6: Usporedba rezultata maksimalne deformacije i naprezanja u slučajevima sa i bez sloja stomatološkog ljepila

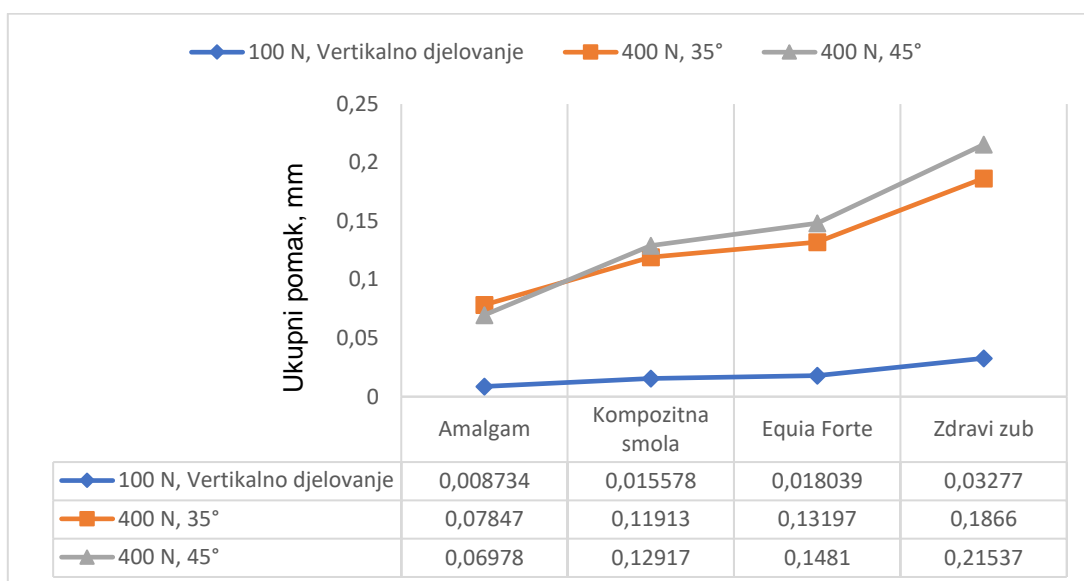
| Sila | Materijal | Ukupni pomak, mm | Ukupni pomak sa slojem ljepila, mm | Postotna promjena | Maksimalno naprezanje, MPa | Maksimalno naprezanje sa slojem ljepila, MPa | Postotna promjena |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------------|-------------------|----------------------------|--|-------------------|
| 100 N, vertikalno djelovanje | Amalgam | 0,008734 | 0,008728 | 0% | 180,49 | 160,60 | -11,02% |
| | Kompozitna smola | 0,015578 | 0,015559 | -0,12% | 179,28 | 158,02 | -11,86% |
| | Equia Forte | 0,018039 | 0,018011 | -0,16% | 179,96 | 157,02 | -12,75% |
| 400 N, djelovanje pod 35° | Amalgam | 0,078470 | 0,035804 | -54,37% | 534,20 | 336,26 | -37,05% |
| | Kompozitna smola | 0,119130 | 0,060639 | -49,10% | 534,66 | 338,17 | -36,75% |
| | Equia Forte | 0,131970 | 0,068545 | -48,06% | 538,77 | 340,17 | -36,86% |
| 400 N, djelovanje pod 45° | Amalgam | 0,069780 | 0,052445 | -24,84% | 883,13 | 309,47 | -64,96% |
| | Kompozitna smola | 0,129170 | 0,086883 | -32,74% | 903,52 | 307,16 | -66,00% |
| | Equia Forte | 0,148100 | 0,097474 | -34,18% | 915,52 | 306,75 | -66,49% |

Tablica 7: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile s kontrolnim (zdravim) zubom

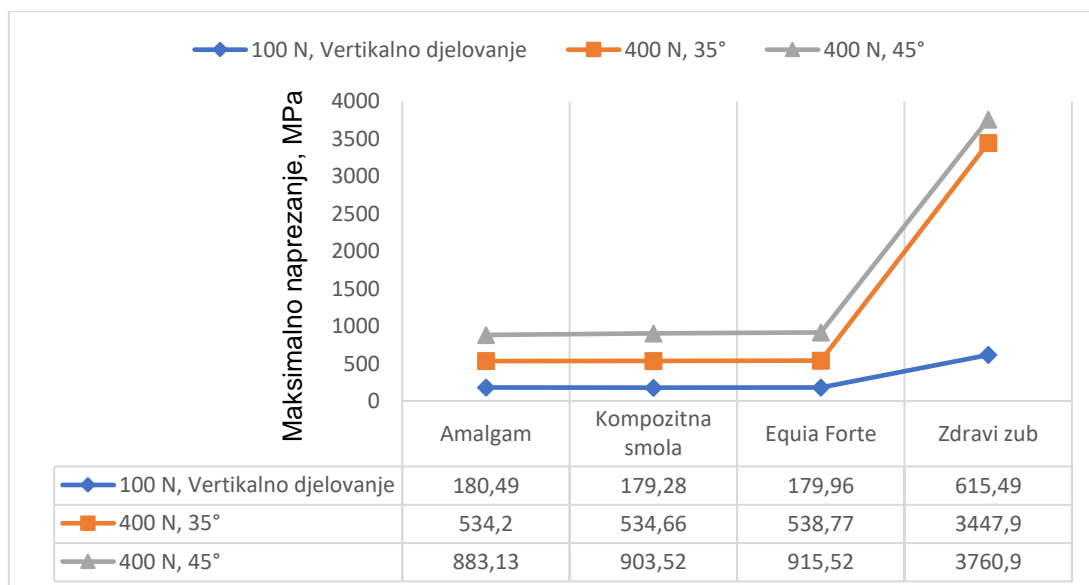
| Sila | Materijal | Ukupni pomak, mm | Ukupni pomak (zdravi zub), mm | Maksimalno naprezanje, MPa | Maksimalno naprezanje (zdravi zub), MPa |
|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| 100 N, vertikalno djelovanje | Amalgam | 0,008734 | 0,03277 | 180,49 | 615,49 |
| | Kompozitna smola | 0,015578 | | 179,28 | |
| | Equia Forte | 0,018039 | | 179,96 | |
| 400 N, djelovanje pod 35° | Amalgam | 0,078470 | 0,18660 | 534,20 | 3447,9 |
| | Kompozitna smola | 0,119130 | | 534,66 | |
| | Equia Forte | 0,131970 | | 538,77 | |
| 400 N, djelovanje pod 45° | Amalgam | 0,069780 | 0,21537 | 883,13 | 3760,9 |
| | Kompozitna smola | 0,129170 | | 903,52 | |
| | Equia Forte | 0,148100 | | 915,52 | |

Tablica 8: Usporedba utjecaja materijala ispuna sa slojem stomatološkog ljepila na različite sile s kontrolnim (zdravim) zubom

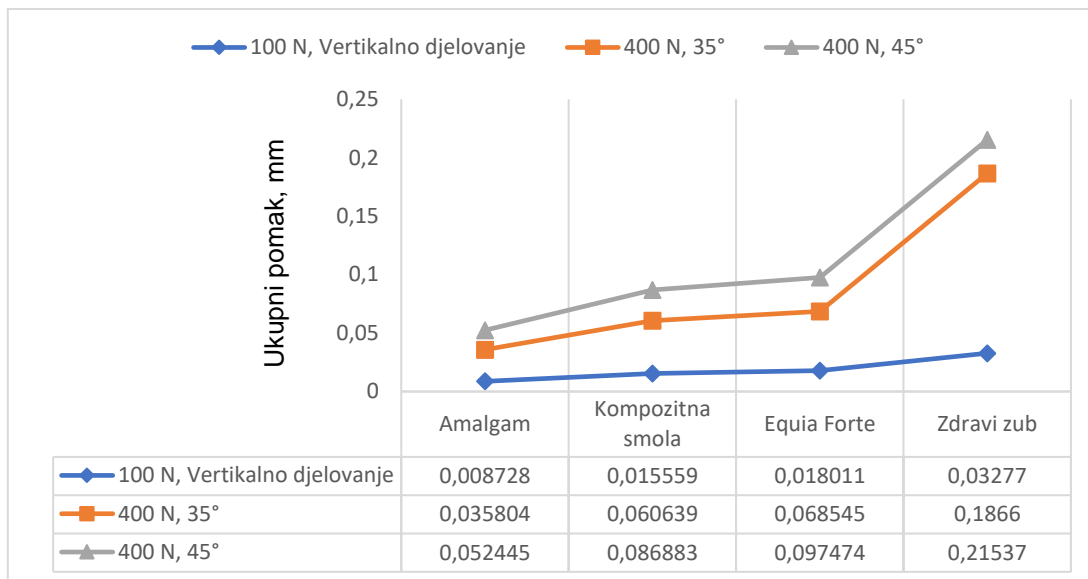
| Sila | Materijal | Ukupni pomak, mm | Ukupni pomak (zdravi zub), mm | Maksimalno naprezanje, MPa | Maksimalno naprezanje (zdravi zub), MPa |
|------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| 100 N, vertikalno djelovanje | Amalgam | 0,008728 | 0,03277 | 160,60 | 615,49 |
| | Kompozitna smola | 0,015559 | | 158,02 | |
| | Equia Forte | 0,018011 | | 157,02 | |
| 400 N, djelovanje pod 35° | Amalgam | 0,035804 | 0,18660 | 336,26 | 3447,9 |
| | Kompozitna smola | 0,060639 | | 338,17 | |
| | Equia Forte | 0,068545 | | 340,17 | |
| 400 N, djelovanje pod 45° | Amalgam | 0,052445 | 0,21537 | 309,47 | 3760,9 |
| | Kompozitna smola | 0,086883 | | 307,16 | |
| | Equia Forte | 0,097474 | | 306,75 | |



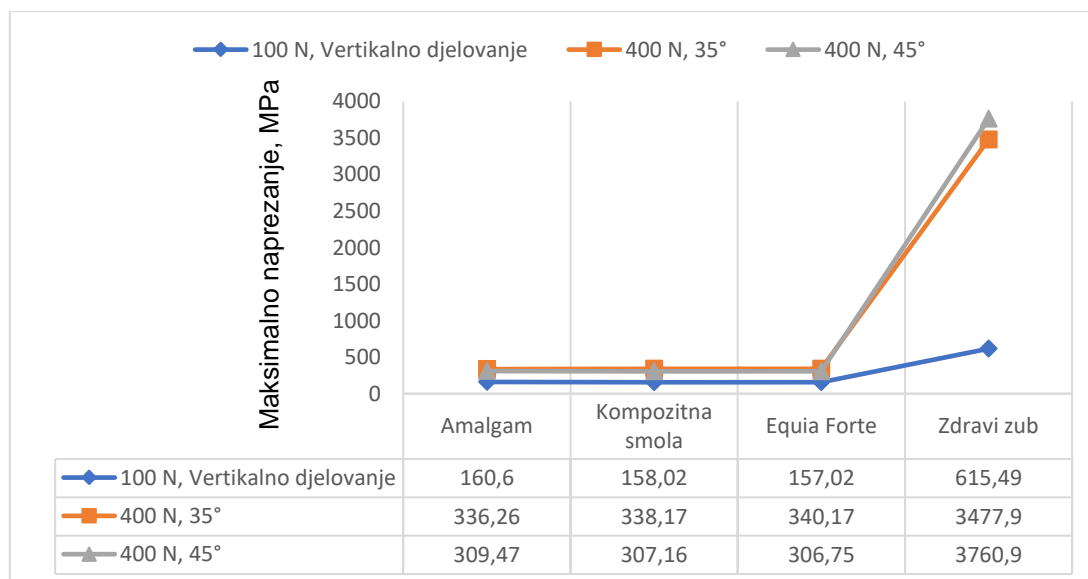
Slika 6.3: Usporedba ukupnog pomaka na materijalima ispuna i na zdravom zubu, bez sloja stomatološkog ljepila



Slika 6.4: Usporedba maksimalnog naprezanja na materijalima ispuna i na zdravom zubu, bez sloja stomatološkog ljepila



Slika 6.5: Usporedba ukupnog pomaka na materijalima ispuna i na zdravom zubu, sa slojem stomatološkog ljepila



Slika 6.6: Usporedba maksimalnog naprezanja na materijalima ispuna i na zdravom zubu, sa slojem stomatološkog ljepila

6.1 Diskusija rezultata i komentar

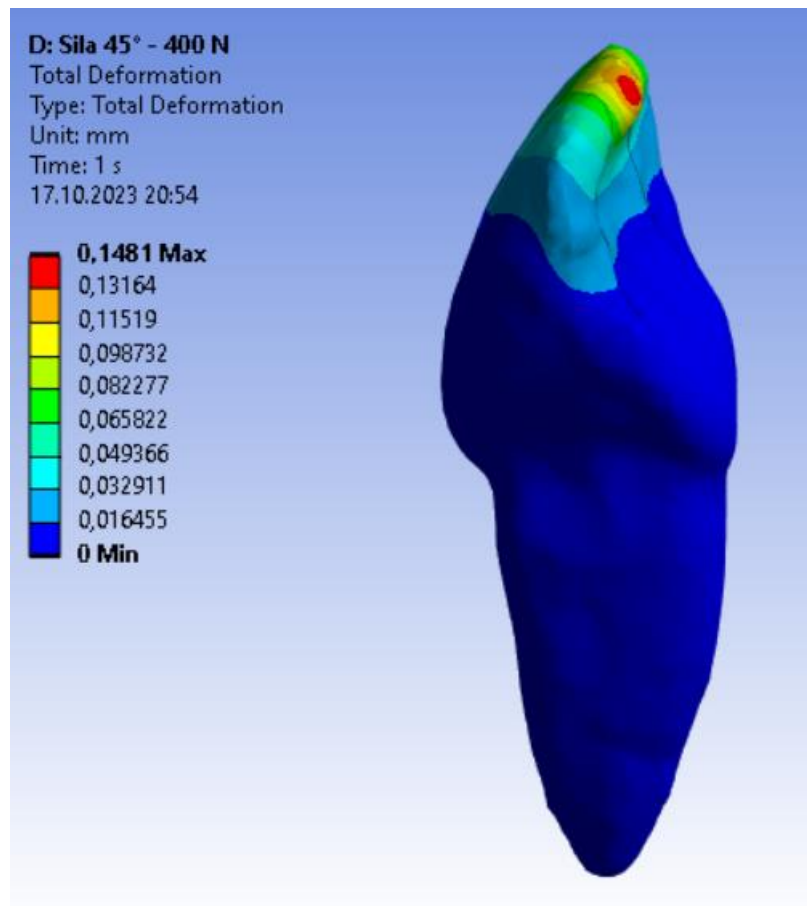
Iz dobivenih rezultata je razvidno kako bilo koja od analiziranih ispuna pozitivno utječe na ukupni pomak i maksimalno naprezanje. Tablica 7 i 8 prikazuju usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim analizom zdravog zuba. Vidljivo je kako su rezultati dobiveni na zdravom zubu višestruko veći u odnosu na analizu zuba s ispunama. Razlog tome su svojstva materijala, uz efekt krutog tijela zuba koji je iz jednog dijela. Upravo su najveće očitane vrijednosti ukupnog pomaka i maksimalnog naprezanja očitane na zdravom zubu: Ukupni pomak 0,21537 mm, maksimalno naprezanja 3760,90 MPa (vidljivo u tablicama 7 i 8).

Govoreći o usporedbi ispuna kod slučajeva bez sloja stomatološkog ljepila, u tablici 4 je vidljivo kako najmanja očitavanja ukupnog pomaka pod djelovanjem svih sila primijećena na amalgamskim ispunama. Isto je vidljivo i kod rezultata maksimalnog naprezanja. Analogno, isti trend je vidljiv i u rezultatima prikazanim u tablici 5, gdje su rezultati ukupnih pomaka i maksimalnih naprezanja za slučajeve sa slojem stomatološkog ljepila između ispune i zuba.

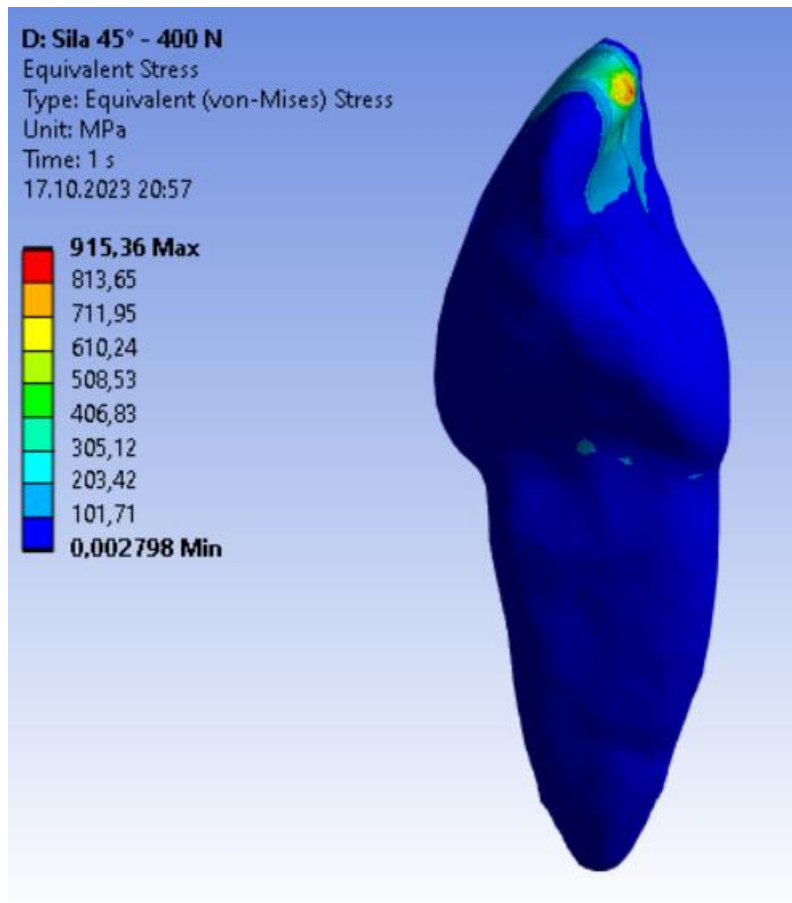
Tablica 6 uspoređuje ukupne pomake i maksimalna naprezanja usporedno u slučajevima istih materijala sa i bez sloja stomatološkog ljepila. Iz tablice i rezultata je razvidno kako sloj stomatološkog ljepila pozitivno utječe na smanjenje ukupnih pomaka i naprezanja, što je posebno vidljivo u slučajevima kosih sila (pod djelovanjem 35° i 45° u odnosu na vertikalnu os). Najveće smanjenje ukupnog pomaka je vidljivo kod djelovanja sile od 400 N pod kutom od 35°, kod ispune od kompozitne smole. U konkretnom slučaju, smanjenje ukupnog pomaka je 49,10%. S druge strane, najveće smanjenje maksimalnog naprezanja je vidljivo kod ispune od *Equie Forte*, kod djelovanja sile od 400N pod kutom od 45°. Maksimalno naprezanje je manje za 66,49%.

Slike 6.3, 6.4, 6.5 i 6.6 prikazuju grafove odnosa rasta ukupnog pomaka i maksimalnog naprezanja, redom od najmanjih očitanih rezultata do najvećih. Grafovi su raspodijeljeni na način da svaki prikazuje sva tri slučaja sila i sva tri materijala ispuna, u slučaju sa i bez sloja stomatoloških ljepila.

Slike 6.7 i 6.8 prikazuju grafičke rezultate slučaja najvećeg očitnog ukupnog pomaka (u slučaju zuba sa ispunom, sila od 400 N pod kutom od 45°, ispuna od *Equie Forte*), i rezultate slučaja najvećeg očitnog maksimalnog napreznja (u slučaju zuba sa ispunom, sila od 400 N pod kutom od 45°, ispuna od *Equie Forte*) – oba slučaja bez sloja stomatološkog ljepila.



Slika 6.7: Grafički prikaz rezultata ukupnog pomaka u slučaju ispune od *Equie Forte*, pod djelovanjem sile od 400 N na kutu od 45°, bez sloja stomatološkog ljepila



Slika 6.8: Grafički prikaz rezultata maksimalnog naprezanja u slučaju ispune od Equie Forte, pod djelovanjem sile od 400 N na kutu od 45°, bez sloja stomatološkog ljepila

7. Zaključak

Ovaj rad obuhvaća numeričku analizu jednokorjenog zuba sa ispunama i stomatološkim ljepilom. Definirana su tri materijala ispuna koja su bila predmet istraživanja, uz stomatološko ljepilo kao dodatni sloj između zuba i ispune. Prethodno pristupanju na numeričku analizu je pripremljen model zuba, koji je dobiven CBTC snimanjem nakon čega je obrađen CAD programom. Kao priprema za unos modela u Ansys, programski paket za računalnu numeričku analizu, model je u CAD/CAM/CAE programu Fusion 360 (Education) prilagođen analizi. Izrezan je komad koji predstavlja ispunu, te je naknadno dodan i sloj od 0,01 mm koji predstavlja stomatološko ljepilo. Modeli su zatim uvezeni u Ansys 2023 R2 Student gdje su postavljene simulacije u 7 slučajeva (analiza). Analize su postavljene na način da je moguće razlučiti utjecaj materijala ispune, kao i prisutnost stomatološkog ljepila na ukupni pomak i maksimalno naprezanje. Rezultati ukratko ukazuju kako bilo koja ispunu zbog svojih mehaničkih svojstava pomaže pri smanjenju ukupnog pomaka i maksimalnog opterećenja. Promatrajući vrste ispuna, razvidno je kako amalgamske ispune imaju najmanje pomake i naprezanja, dok ispune novije generacije imaju veće pomake i maksimalna naprezanja, iako su razlike u naprezanjima minimalne (+/- 2-5 MPa). Promatrajući pak utjecaj prisutnosti stomatološkog ljepila, moguće je vidjeti kako stomatološko ljepilo pomaže pri smanjenju pomaka i naprezanja kod istih materijala, posebice kod sila pod kutom, gdje su razlike u naprezanjima i ukupnim pomacima manje u intervalu 37,05% do čak 66,49%.

Bruno Habus
Krapinske Toplice, 17. listopada 2023.



8. Literatura

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zub>, pristupljeno 13.10., 10:45
- [2] <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>, pristupljeno 13.10., 11:10
- [3] <https://www.nagwa.com/en/explainers/940192346175/>, pristupljeno 13.10., 12:45
- [4] S. Sudip, R. Sougata: *Metallic Dental Implant Wear Mechanisms, Materials, and Manufacturing Processes: A Literature Review*, Materials, 2022.
- [5] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "dentin". Enciklopedija Britannica, 2014, <https://www.britannica.com/science/denti>, pristupljeno 13.10., 14:15
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/Dentin>, pristupljeno 13.10., 14:20
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Tooth_enamel, pristupljeno 13.10., 14:45
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cementum>, pristupljeno 13.10., 14:55
- [9] [https://bs.wikipedia.org/wiki/Amalgam_\(stomatologija\)](https://bs.wikipedia.org/wiki/Amalgam_(stomatologija)), pristupljeno 13.10., 19:25
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Amalgam_\(dentistry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Amalgam_(dentistry)), pristupljeno 13.10., 19:35
- [11] P.S. Stein, J. Sullivan, J.E. Haubenreich, P.B. Osborne, *Composite resin in medicine and dentistry*, Department of Oral Health Practice, University of Kentucky College of Dentistry, 2005.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Dental_composite, pristupljeno 13.10., 20:25
- [13] https://cdn.gceurope.com/v1/PID/equiaforte/leaflet/LFL_EQUIA_Forte_en.pdf, pristupljeno 13.10., 21:30
- [14] L. Šimunović, B. Špiljak, *Utjecaj ionizacijskog zračenja na restaurativne materijale s učinkom otpuštanja fluora*, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [15] <https://www.acerocrowns.com/dental-glue-for-crowns>, pristupljeno 13.10., 21:40
- [16] <https://www.choice-dental.com.au/are-dental-caries-and-cavities-the-same-thing/>, pristupljeno 14.10., 09:55
- [17] <https://www.nhakhoano1.com/what-is-dental-pulp/>, pristupljeno 14.10., 10:15
- [18] <https://www.smilesofhollywood.com/single-post/2018/05/03/the-facts-on-fillings-amalgam-vs-resin-composite>, pristupljeno 14.10., 10:40

- [19] <https://dental-art.hr/savjeti/inlay-onlay-i-overlay-ispuni/>, pristupljeno 14.10., 11:10
- [20] P. Ausiello, S. Rengo, C.L. Davidson, D.C. Watts, *Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations: a 3D-FEA study*, Dental Materials, 2004.
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk>, pristupljeno 14.10., 18:35
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_360, pristupljeno 14.10., 18:50
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Application-of-Single-Bond-Universal-adhesive-system-3M-ESPE_fig3_330892714, pristupljeno 14.10., 18:55
- [24] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>, pristupljeno 15.10., 09:50
- [25] <https://www.adobe.com/creativecloud/file-types/image/vector/step-file.html>, pristupljeno 15.10., 11:30
- [26] https://www.graspingineering.com/category/fea_article/fea_basics/, pristupljeno 15.10., 16:00
- [27] D. Kozak: Metoda konačnih elemenata - uvod i primjeri primjene, Numeričko modeliranje, prezentacija, Sveučilište Sjever, 2022.
- [28] P. Ausiello, S. Rengo, C.L. Davidson, D.C. Watts, *Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations: a 3D-FEA study*, Dental Materials, 2004.
- [29] P. Ausiello, P. Franciosa, M. Martorelli, D.C. Watts, *Numerical fatigue 3D-FE modeling of indirect composite-restored posterior teeth*, Dental Materials, 2010.
- [30] J.T.Varghese, B. Babaei, P. Farrar, L. Prentice, B.G. Prusty, *Influence of thermal and thermomechanical stimuli on a molar tooth treated with resin-based restorative dental composites*, Dental Materials, 2022.

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1.1: Pregled rasporeda zubi na gornjoj i donjoj čeljusti [3]..... | 3 |
| Slika 1.2.: Pregled oblika zubi prema položaju u čeljusti [3]..... | 3 |
| Slika 1.3: Građa zuba [4]..... | 5 |
| Slika 1.4: Pojava karijesa [16] | 6 |
| Slika 2.1: Povezanost pulpe sa živčanim i krvožilnim sustavom [17]..... | 9 |
| Slika 3.1: Usporedba amalgamske i kompozitne ispune (plombe) na istim zubima [18] | 11 |
| Slika 3.2: Usporedba Inlay, Onlay i Overlay ispuna [18]..... | 11 |
| Slika 3.3: Nanošenje stomatološkog ljepila [23] | 15 |
| Slika 4.1: Model zuba u programu Fusion 360 | 17 |
| Slika 4.2: Model izrezanog dijela zuba i odgovarajući 2D sketch | 18 |
| Slika 4.3: Model izrezane ispune i odgovarajući sketch | 19 |
| Slika 4.4: Opcija joint za spajanje dva modela u jedan funkcionalni model..... | 20 |
| Slika 4.5: Sketch modela sloja ljepila | 21 |
| Slika 4.6: Model sloja ljepila..... | 22 |
| Slika 4.7: Završeni spojeni model koji se sastoji od izrezanog zuba, sloja ljepila i ispune | 22 |
| Slika 4.8: Sučelje Ansys Workbencha s označenom karticom statičke analize | 23 |
| Slika 4.9: Kartica postavki statičke strukturne analize..... | 24 |
| Slika 4.10: Osnovni pregled konačnih elemenata [26] | 27 |
| Slika 5.1: Prikaz spojeva modela bez sloja stomatološkog ljepila | 33 |
| Slika 5.2: Prikaz spojeva modela sa slojem stomatološkog ljepila | 34 |
| Slika 5.3: Usporedba mreže prije (lijevo) i nakon (desno) korištenja opcije Sizing | 35 |
| Slika 5.4: Prikaz postavljenog rubnog uvjeta uklještenja (Fixes Support)..... | 36 |
| Slika 5.5: Prikaz novog koordinatnog sustava na vrhu zuba, rotiranog 45° u odnosu na vertikalnu liniju | 37 |
| Slika 5.6: Pregled hvatišta (smjerova) sila..... | 38 |
| Slika 6.1: Grafički prikaz ukupnog pomaka, analiza 1 | 39 |
| Slika 6.2: Grafički prikaz maksimalnog naprežanja (von Misses), zadatak 1 | 40 |
| Slika 6.3: Usporedba ukupnog pomaka na materijalima ispuna i na zdravom zubu, bez sloja stomatološkog ljepila | 46 |

| | |
|---|----|
| Slika 6.4: Usporedba maksimalnog naprezanja na materijalima ispuna i na zdravom zubu, bez sloja stomatološkog ljepila | 46 |
| Slika 6.5: Usporedba ukupnog pomaka na materijalima ispuna i na zdravom zubu, sa slojem stomatološkog ljepila | 47 |
| Slika 6.6: Usporedba maksimalnog naprezanja na materijalima ispuna i na zdravom zubu, sa slojem stomatološkog ljepila | 47 |
| Slika 6.7: Grafički prikaz rezultata ukupnog pomaka u slučaju ispune od Equie Forte, pod djelovanjem sile od 400 N na kutu od 45°, bez sloja stomatološkog ljepila | 49 |
| Slika 6.8: Grafički prikaz rezultata maksimalnog naprezanja u slučaju ispune od Equie Forte, pod djelovanjem sile od 400 N na kutu od 45°, bez sloja stomatološkog ljepila..... | 50 |

Popis tablica

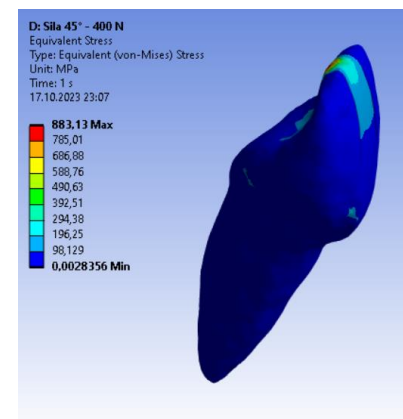
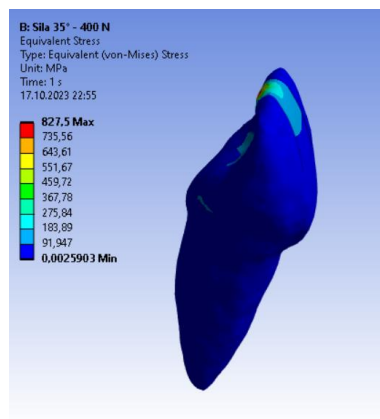
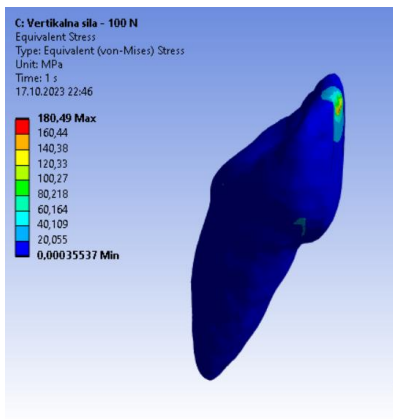
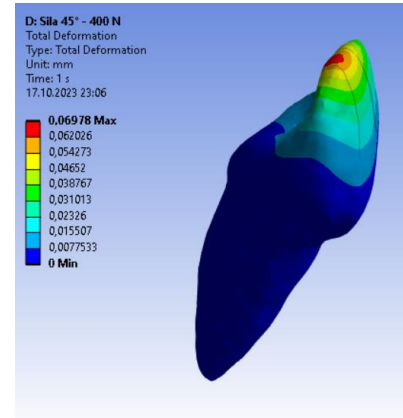
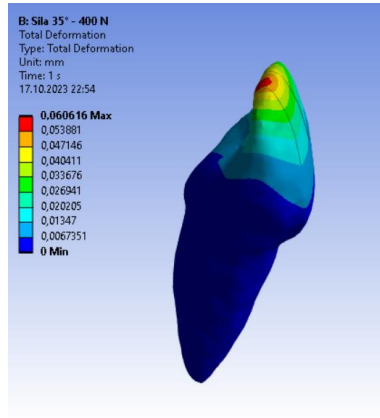
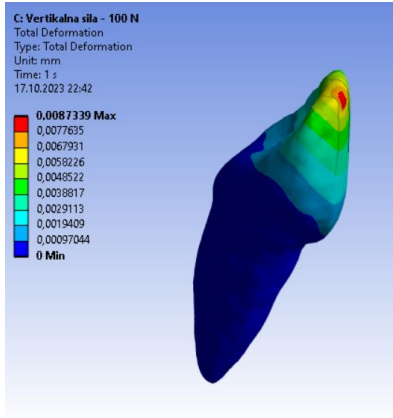
| | |
|--|----|
| Tablica 1: FDI metoda numeriranja zubi..... | 4 |
| Tablica 2: Prikaz programskih zadataka..... | 31 |
| Tablica 3: Prikaz svojstva materijala | 32 |
| Tablica 4: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile, bez sloja stomatološkog ljepila..... | 42 |
| Tablica 5: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile, sa dodanim slojem stomatološkog ljepila..... | 43 |
| Tablica 6: Usporedba rezultata maksimalne deformacije i naprezanja u slučajevima sa i bez sloja stomatološkog ljepila..... | 44 |
| Tablica 7: Usporedba utjecaja materijala ispuna na različite sile s kontrolnim (zdravim) zubom | 45 |
| Tablica 8: Usporedba utjecaja materijala ispuna sa slojem stomatološkog ljepila na različite sile s kontrolnim (zdravim) zubom..... | 45 |

Popis jednađbi

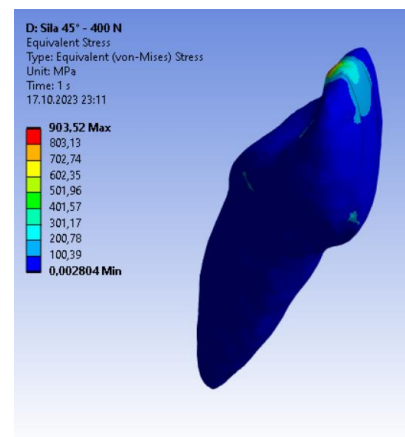
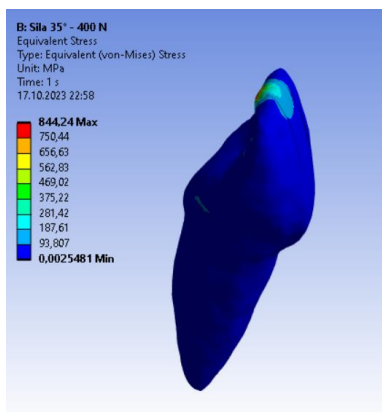
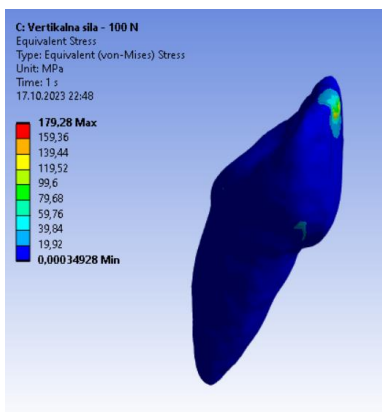
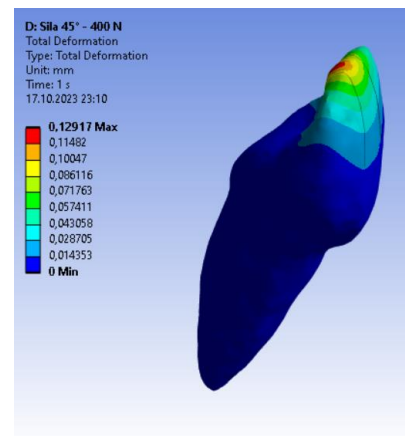
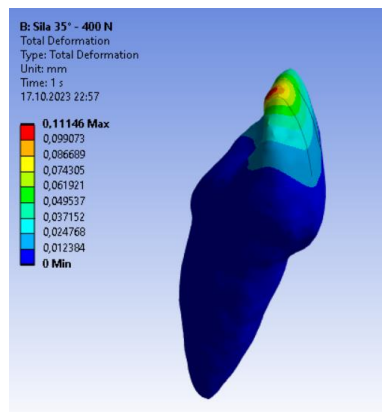
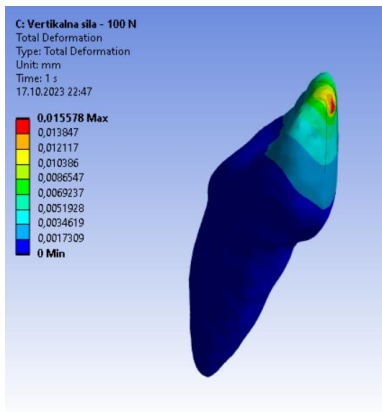
- Jednađba 1: Izvod lokalne matrice krutosti 3D konačnog elementa [27] 27
- Jednađba 2: Rješavanje linearnog sustava od n jednađbi s n nepoznanica [27] ... 27

Prilozi

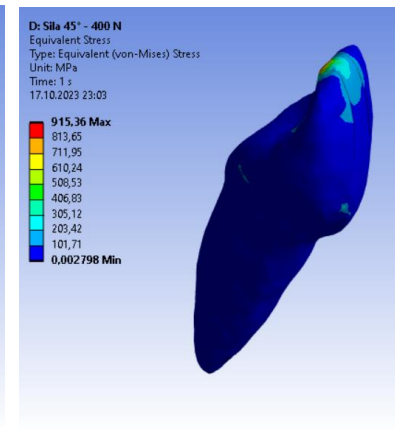
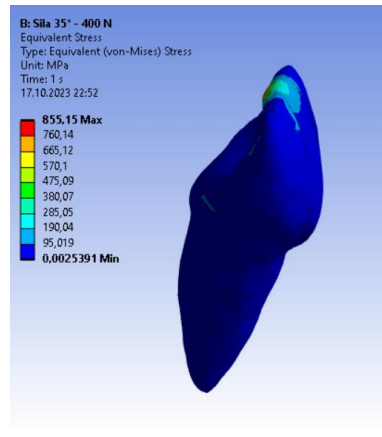
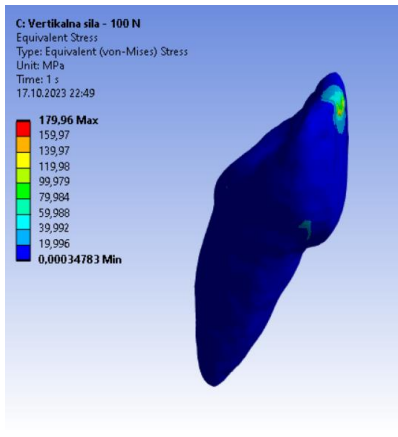
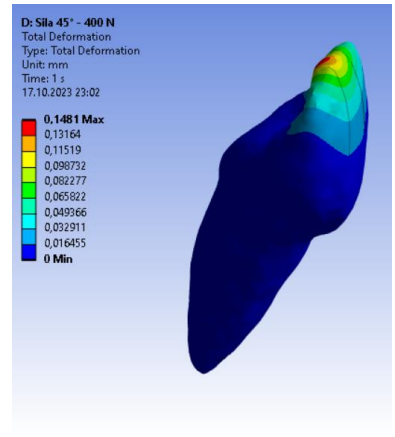
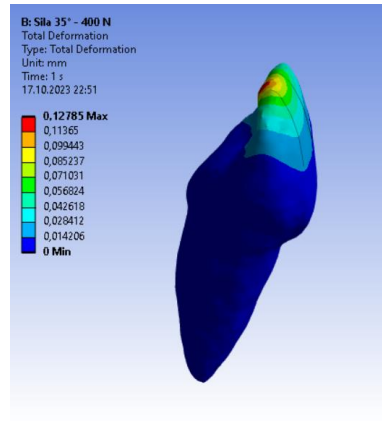
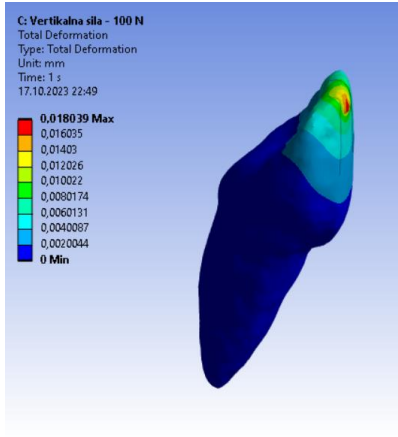
Prilog 1



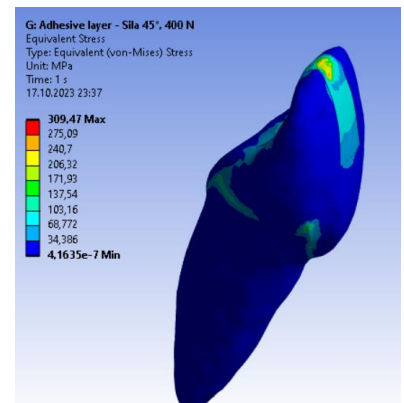
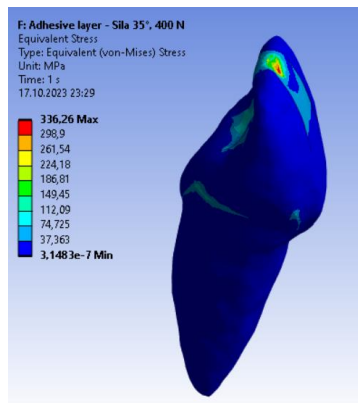
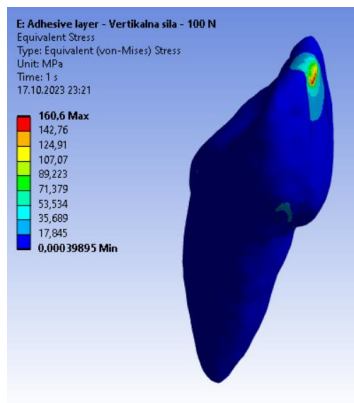
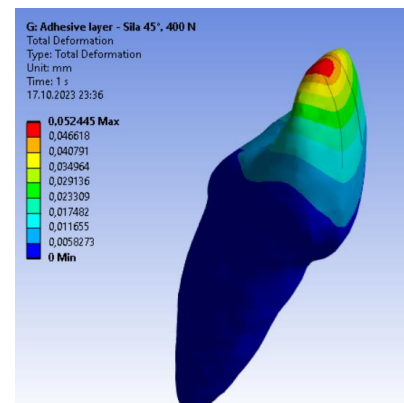
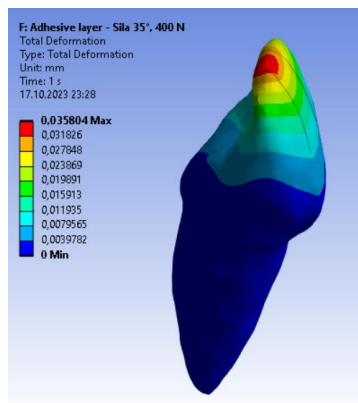
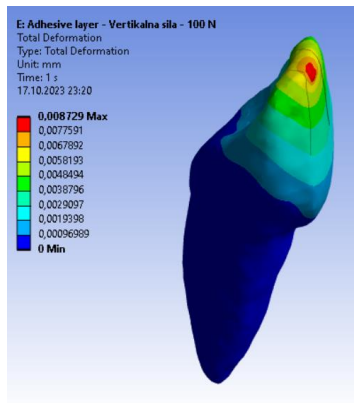
Prilog 2



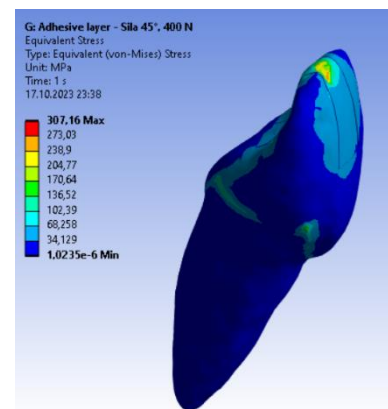
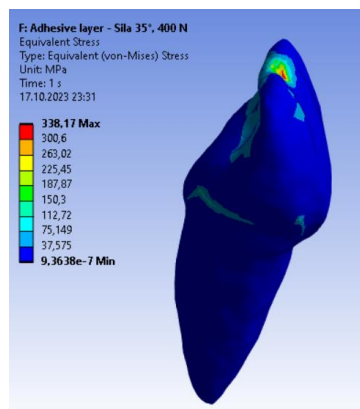
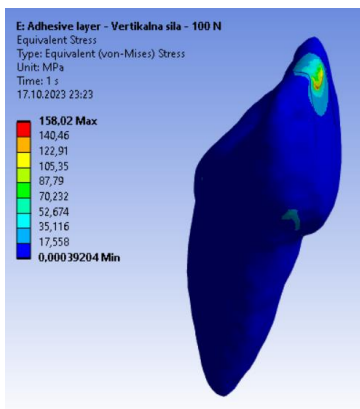
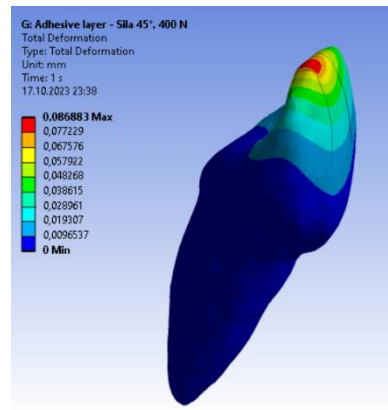
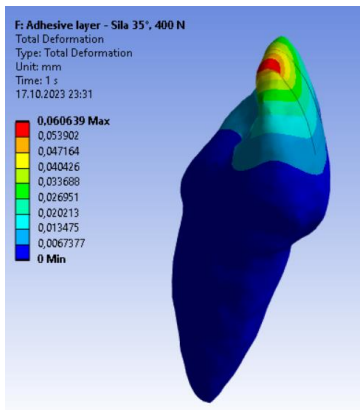
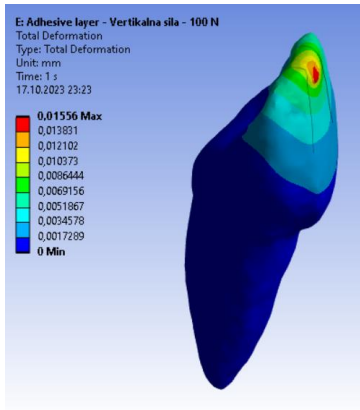
Prilog 3



Prilog 4



Prilog 5



Prilog 6

