

Odgovor gornjega središnjega sjekutića na opterećenje u ovisnosti o stupnju razvoja korijena

Bučević-Sojčić, Petra

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, School of Dental Medicine / Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:127:969367>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb School of Dental Medicine Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu

Stomatološki fakultet

Petra Bučević Sojčić

**ODGOVOR GORNJEGA SREDIŠNJEGA
SJEKUTIĆA NA OPTEREĆENJE U
OVISNOSTI O STUPNJU RAZVOJA
KORIJENA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

Stomatološki fakultet

Petra Bučević Sojčić

**ODGOVOR GORNJEGA SREDIŠNJEGA
SJEKUTIĆA NA OPTEREĆENJE U
OVISNOSTI O STUPNJU RAZVOJA
KORIJENA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr.sc. Hrvoje Jurić

Doc. dr. sc. tech. Jasna Leder Horina

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

School of Dental Medicine

Petra Bučević Sojčić

**Biomechanical response of the upper
central incisor depending on the root
development stage**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:

Prof. Hrvoje Jurić, DMD, MSc, PhD

Asst. Prof. Jasna Leder Horina, PhD

Zagreb, 2024.

Rad je izrađen na Zavodu za dječju i preventivnu stomatologiju Stomatološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Zavodu za tehničku mehaniku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta Hrvatske naklade za znanost “*Istraživanje i razvoj novih mikro i nanostrukturnih bioaktivnih materijala u dentalnoj medicini*”.

Voditelj projekta: Prof. dr. sc. Ivana Miletić

Mentori:

Prof. dr. sc. Hrvoje Jurić, Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet, Zavod za dječju i preventivnu stomatologiju

Doc. dr. sc. tech. Jasna Leder Horina, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zavod Samostalne katedre, Katedra za opće programske sadržaje

Lektor hrvatskog jezika: Ivana Parlov, prof. hrvatskog jezika, Zagreb

Lektor engleskog jezika: Tila Kallay, prof. engleskog i njemačkog jezika, Zagreb

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu doktorskog rada:

1. Prof.dr.sc. Dubravka Negovetić Vranić, predsjednica

2. Prof.dr.sc. Marina Lapter Varga, član

3. Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić, član

4. Izv.prof.dr.sc. Tomislav Škrinjarić, zamjena

Datum obrane rada: 15. listopada 2024.

Rad sadržava: 110 stranica

67 slika

14 tablica

2 CD-a

Rad je vlastito autorsko djelo, koje je u potpunosti samostalno napisano uz naznaku izvora drugih autora i dokumenata korištenih u radu. Osim ako nije drukčije navedeno, sve ilustracije (tablice, slike i dr.) u radu izvorni su doprinos autora poslijediplomskog doktorskog rada. Autor je odgovoran za pribavljanje dopuštenja za korištenje ilustracija koje nisu njegov izvorni doprinos, kao i za sve eventualne posljedice koje mogu nastati zbog nedopuštenog preuzimanja ilustracija odnosno propusta u navođenju njihova podrijetla.

Prve zahvale idu mojim mentorima prof. Hrvoju Juriću i doc. Jasni Leder Horina koji su me bezrezervno vodili u ovoj "avanturi" stjecanja titule doktorice znanosti. Hvala vam na pomoći, strpljenju, iskustvu i savjetima tijekom izrade ovoga rada. Dodatno zahvaljujem prof. Juriću na neizmjerljivoj podršci u svakodnevnom radu i oblikovanju mene kao osobe i liječnice dječje stomatologije, posebno "četvrtkom".

Hvala prof. Ivani Miletić i prof. Tanji Jurčević Lulić na velikom zalaganju i pomoći oko rada.

Veliko hvala mojem prijatelju i kolegi Mateju Paru na nesebičnoj pomoći i koji je uvijek bio tu kada treba s jasnom vizijom i rješenjem svakog problema.

Veliko hvala magistri inženjerki strojarstva Nini Bočkaj na zalaganju, predanosti, stručnosti, uloženom vremenu i pomoći bez koje bi ovaj rad bio neizvediv.

Hvala prof. Tomislavu Škrinjariću na prijateljstvu i svakodnevnoj podršci.

Hvala prof. Luki Grubišiću na pomoći i savjetima u ranim počecima.

Hvala prof. Ivani Parlov i prof. Tili Kallay na neizmjerljivoj pomoći oko obrade teksta.

Zahvaljujem svojem suprugu koji svim srcem pokazuje vjeru u sve moje odluke, koji je uvijek tu za mene i koji mi je najveća podrška u životu.

Hvala mojoj dragoj dječici na ljubavi i što mi daju snagu da se borim i nikada ne odustajem od snova.

Zahvaljujem svojim roditeljima na podršci koju su mi pružali kroz cijelo vrijeme školovanja i bez čije svakodnevne pomoći (ponajviše kao djeda i bake) teško mogu zamisliti svoje uspjehe. Posebno hvala mojem tati na svakoj pruženoj minuti i satu bez kojih bi ove stranice još dugo čekale svoje korice.

Zahvaljujem svojoj svekrvi i svekru na nesebičnoj pomoći i podršci od samog početka ovog rada i općenito u životu.

Hvala mojim sestrama na vrijednim životnim lekcijama, mudrostima i radostima.

Hvala cijeloj obitelji, šogoricama, šogorima, nećakinjama i nećacima.

Posebno hvala mojoj dragoj prijateljici i kolegici Jesenki Jeličić na bezuvjetnoj podršci i ljubavi.

Hvala svim mojim dragim prijateljima, posebno hvala Tei, Lidiji, Mariji, Ines, Jeleni, Sanji, Karmeli, Vedrani, Indi, Nuši, Danijeli, Dijani, Ljudi, Vedranu, Željku, Borni, Mihi, Katarini, Dubici, Ivi, Sarah, Jasni, Karli, Ivani, Luki... koji su me podržavali cijelo ovo vrijeme i bili uvijek tu za mene.

Hvala mojem Zavodu za dječju i svim prijateljima koje sam tamo stekla.

Hvala Andrijani Čerluka Venžeri i Tomislavu Grizelju na pokretačkom vjetru.

Hvala svima koji su pomogli u izradi ovoga rada!

Sažetak

Odgovor gornjega središnjega sjekutića na opterećenje u ovisnosti o stupnju razvoja korijena

Svrha ovog istraživanja bila je ispitati biomehanički odgovor avitalnoga mladog trajnog sjekutića nakon postendodontske terapije s obzirom na razvojni stadij korijena koristeći metodu konačnih elemenata (MKE). Jedan CBCT poslužio je za rekonstrukciju osnovnog 3D modela gornjeg središnjeg sjekutića (GSS) i njegove okolne kosti (programski paket Mimics verzija 16.0. Materialise, Leuven, Belgija) nakon čega se napravila mreža konačnih elemenata (programski paket za analizu MKE Abaqus USA). Iz personaliziranoga 3D modela zuba (OMZ) konstruirano je više drugih modela GSS-a prema razvojnim stadijima korijena: razvoj jedne polovine korijena (S1), tri četvrtine (S2), više od tri četvrtine (S3), potpuno razvijeni korijen s otvorenim apeksom (S4) te sa zatvorenim apeksom (S5); zatim i prema vrsti intrakanalne retencije: RelyX Post3M ESPE Deutschland GmbH, Seefeld, Njemačka (RXP), GC fiber post GC, Tokio, Japan (GCP), metal post Unimetric 1.0 Dentsply, Ballaigues, Švicarska (UMP), everStick Post GC, Tokio, Japan (ESP) te pozitivna kontrolna skupina bez retencije (GPK). Na palatinalnu plohu zuba primijenilo se statičko opterećenje iznosa 100N pod kutom od 45 stupnjeva te su izmjerena ekvivalentna naprezanja prema Henckey von Misesovoj (HMH) teoriji čvrstoće. Srednje vrijednosti HMH naprezanja unutar pojedinog stadija razvoja korijena bile su statistički značajno veće na cervikalnoj razini kod svih ispitivanih modela u S3, S4 i S5 stadiju, te kod ESP, GFP, GPK i OMZ u stadiju S2 dok su kod ostalih modela bile značajno veće na apikalnoj razini. Najmanje vrijednosti HMH naprezanja na cervikalnoj razini imali su ESP u S1 i S3 stadiju te GFP u S4 i S5 stadiju dok su na apikalnoj razini imali UMP u S1 stadiju, GFP u S2, S3 i S5 stadiju te GPK u S4 stadiju. Unatoč ograničenjima ove studije, može se zaključiti da se najveće HMH naprezanje kod mladoga trajnog GSS-a nalazilo na cervikalnoj razini, osim u početnom stadiju razvoja korijena te da postendodontska opskrba zuba postavom intrakanalne retencije nije smanjivala razvoj naprezanja unutar korijenskog dentina.

Ključne riječi: gornji središnji sjekutić, dentalna trauma, postendodontska opskrba zuba intrakanalna retencija, metoda konačnih elemenata

Summary

Biomechanical response of the upper central incisor depending on the root development stage

Introduction: Dental trauma is very common in school-age children, primarily between the ages of 8 to 10, often resulting in a crown fracture of the upper central incisor. When endodontic treatment is required, an additional difficulty arises due to the "immaturity of the teeth", i.e. the incomplete development of the root. Treating an immature tooth with a non-vital pulp is a major challenge in paediatric dentistry. Reconstructing a complicated crown fracture often requires intracanal retention. Many clinical studies have shown that more than 50% of young permanent teeth with incomplete root development and necrotic pulp are lost in the first 10 years despite endodontic treatment, which also has a very negative impact on the child's psychosocial development. Biomechanical analysis is crucial to understanding the failure of dental trauma treatment and evaluating the materials used. Finite element analysis is often used for such complex research in biomedicine.

Aim: The aim of this study was to investigate the biomechanical response of a non-vital young permanent incisor after post-endodontic therapy with regard to the developmental stage of the root using the finite element method (FEM).

Material and methods: A CBCT scan was used to reconstruct a basic 3D model of the upper central incisor and surrounding bone (software package Mimics version 16.0, Materialise, Leuven, Belgium), after which a finite element mesh was created (FEM software package Abaqus, USA). Based on the personalised 3D tooth model (OMZ), several other models were created according to the root development stages: 1/2 root development (S1), 3/4 (S2), more than 3/4 (S3), fully developed root with an open apex (S4) and fully developed root with a closed apex (S5). Models were also created according to the type of intracanal retention: RelyX Post (3M ESPE Deutschland GmbH, Seefeld, Germany) (RXP); GC Fibre Post (GC, Tokyo, Japan) (GFP); everStick Post (GC, Tokyo, Japan) (ESP); metal post Unimetric 1.0 (Dentsply, Ballaigues, Switzerland) (UMP); and a positive control group without retention (GPK). A static load of 100N was applied to the palatal surface of the tooth at an angle of 45 degrees and the equivalent stresses were measured according to the Henckey von Mises (HMH) strength theory. The analysis was performed using a three-way analysis of variance (ANOVA) with the factors "material", "stage of development" and "root level

(apical/cervical)". For multiple comparisons, a one-way ANOVA with Tukey adjustment was used. The significance level was set at 0.05. Statistical analysis was performed using the SPSS software package, version 25.0 (IBM, Armonk, NY, USA).

Results: The mean HMN stress values within each stage of root development were statistically significantly higher at the cervical level in all models examined in the S3, S4 and S5 stages, and at the S2 stage in the ESP, GFP, GPK and OMZ models. Conversely, stress values were significantly higher at the apical level in the RXP and UMP models at the S2 stage and in all models at the S1 stage. The ESP model in the S1 and S3 stages and the GFP model in the S4 and S5 stages showed the lowest stress values at the cervical level. At the apical level, the lowest stress values were displayed by the UMP model in the S1 stage, the GFP model in the S2, S3 and S5 stages and the GPK model in the S4 stage. The OMZ model showed the highest stress values at the cervical level in all stages, while the highest stress values at the apical level occurred in the OMZ model in the S3 stage and in the RXP model in all other stages. Generally, stress within the root dentine decreased in most models at both levels from the S1 to the S5 stage, with the exception of a major deviation in the GFP and OMZ models, where the S2 stage displayed a statistically significantly lower stress than the S3 stage at the apical level. Additionally, in the UMP model, the S1 stage showed significantly lower stress than the S2 stage at the apical level, and in the ESP model, the S1 stage showed significantly lower stress than all other stages at the cervical level.

Conclusion: Despite the limitations of this study, it can be concluded that the greatest stress in a young permanent maxillary central incisor occurred at the cervical level, except during the initial development of one half of the root. Post-endodontic restoration with an intracanal retention did not reduce the development of stresses within the root dentin. As root development progressed, i.e. as the thickness of the dentine wall increased, stresses generally decreased in all models. The Eversstick post proved to be the best material choice in the earlier stages of root development, while the GC fibre post was the best choice in the later stages of root development at the cervical level. A post geometry with a combined approach of a cylindrical base coronally and a conical end apically proved to be a better choice when selecting an aesthetic intracanal retention compared to a fully conical post geometry. Metal intracanal retentions did not show significantly higher stress development within the root dentin.

Key words: upper central incisor, dental trauma, post-endodontic restoration, intracanal retention, finite element method

Popis kratica

| | |
|-------------|--|
| CBCT | Cone-Beam kompjutorizirana tomografija (engl. <i>Cone beam computed tomography</i>) |
| CT | kompjutorizirana tomografija (engl. <i>Computed tomography</i>) |
| FRC | ojačan komozitnim vlaknima (engl. <i>Fiber-reinforced composite</i>) |
| GSS | gornji središnji sjekutić |
| HERS | Hertwigova epitelna korijenska ovojnica (engl. <i>Hertwig's epithelial root sheath</i>) |
| HMH | ekvivalentna naprezanja prema Henckey von Mises teoriji čvrstoće |
| IPN | interpenetrirajuća polimerna mreža (engl. <i>Interpenetrating polymer network</i>) |
| MKE | metoda konačnih elemenata (engl. <i>Finite element method (FEM)</i>) |
| MTA | mineral trioksid agregat |
| PDL | parodontni ligament |
| RETs | regenerativni endodontski postupci (engl. <i>Regenerative endodontic treatments</i>) |
| SIC | staklenoionomerni cement |

Modeli:

| | |
|------------|---|
| ESP | model s Everstick post intrakanalnom retencijom |
| GFP | model s GC fiberpost intrakanalnom retencijom |
| GPK | model s gutaperka punjenjem u korijenskom kanalu |
| OMZ | osnovni model zuba |
| RXP | model s RelyX post intrakanalnom retencijom |
| UMP | model s Unimetric metal post intrakanalnom retencijom |

Popis značenja simbola u tablicama i na slikama

- K** širina korijena na razini cervikalne linije
- K1** širina dentina distalno na razini cervikalne linije
- K2** širina pulpe na razini cervikalne linije
- K3** širina dentina mezijalno na razini cervikalne linije
- L** širina korijena na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora
- L1** širina dentina distalno na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora
- L2** širina pulpe na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora
- L3** širina dentina mezijalno na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora
- M** širina korijena na udaljenosti 1 mm od apikalnog otvora
- M1** širina dentina distalno na udaljenosti 1 mm od apikalnog otvora
- M2** širina pulpe na udaljenosti 1 mm od apikalnog otvora
- M3** širina dentina mezijalno na udaljenosti 1 mm od apikalnog otvora
- S1** stadij u kojima je razvijena jedna polovina korijena zuba
- S2** stadij u kojem su razvijene tri četvrtine korijena zuba
- S3** stadij u kojem je razvijeno više od tri četvrtine korijena zuba
- S4** potpuno razvijeni korijen s otvorenim apeksom
- S5** potpuno razvijeni korijen sa zatvorenim apeksom

Popis oznaka

| Mehanička svojstva | Oznaka | Mjerna jedinica |
|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Modul elastičnosti | E | MPa |
| Poissonov koeficijent | ν | - |
| σ_{HM} | $\Sigma\sigma\zeta$ | MPa |

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1 Rast i razvoj zuba..... | 2 |
| 1.2 Dentalne traume u djece | 10 |
| 1.2.1 KomPLICIRANI prijelom krune na gornjem mladom trajnom središnjem sjekutiću..... | 13 |
| 1.3 Terapija avitalnoga mladog trajnog zuba | 17 |
| 1.3.1 Endodontska terapija | 18 |
| 1.3.2 Postendodontska opskrba zuba | 21 |
| 1.4 Metoda konačnih elemenata u stomatologiji..... | 32 |
| 2. SVRHA ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE..... | 35 |
| 3. MATERIJALI I METODE..... | 37 |
| 3.1 Izrada personaliziranog 3D modela | 38 |
| 3.2 Izrada modela stadija rasta i razvoja korijena | 43 |
| 3.3 Simulacija prijeloma krune..... | 49 |
| 3.3 Simulacija terapijskog postupka..... | 50 |
| 3.3.1 Endodontsko liječenje..... | 51 |
| 3.3.2 Postendodontska opskrba zuba | 52 |
| 3.5 Uvjeti opterećenja..... | 63 |
| 3.6 Statistička analiza | 63 |
| 4. REZULTATI | 64 |
| 5. RASPRAVA..... | 82 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 91 |
| 7. LITERATURA | 93 |
| 8. ŽIVOTOPIS..... | 107 |

1. UVOD

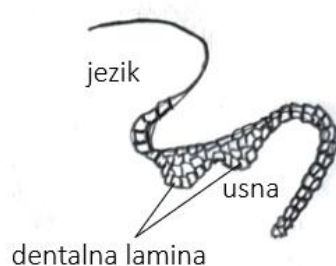
Liječenje dentalnih trauma nije uobičajena situacija u svakodnevnom stomatološkom radu (1, 2). Pravilno zbrinjavanje hitnih slučajeva zahtijeva odgovarajuće iskustvo u postavljanju precizne dijagnoze i u odabiru ispravne i pravovremene terapije uz obvezno kontrolno praćenje kroz dulji period (3, 4). Kod težih traumatskih ozljeda na mladim trajnim zubima česte su komplikacije koje mogu dovesti do gubitka zuba odnosno posljedica koje mogu imati doživotni utjecaj na kvalitetu života (5, 6). Dentalne traume vrlo su česte u djece školske (između 8. i 10. godine) i obično rezultiraju prijelomom krune kod gornjega središnjeg sjekutića u vrlo kritičnom trenutku nezavršenog rasta i razvoja korijena (7). Primarni je cilj liječenja održati vitalnost pulpe a zatim vratiti normalnu funkciju i estetiku. Ipak, u slučaju nekroze pulpe, kao najčešće komplikacije, potrebno je vrlo zahtjevno endodontsko liječenje (8). Također, koronarna rekonstrukcija krune zuba kod takvih strukturno kompromitiranih zubi uglavnom zahtijeva postavu intrakanalne retencije (9). Liječenje nezrelog zuba s avitalnom pulpom je veliki izazov u dječjoj stomatologiji. Mnoge kliničke studije pokazale su da je preko 50% takvih zubi izgubljeno u prvih deset godina nakon provedene endodotske terapije (10–12) što vrlo negativno utječe na djetetov psihosocijalni razvoj (13). Biomehanička analiza nakon terapije dentalne traume vrlo je važna za razumijevanje neuspjeha liječenja i za pronalaženje odgovarajućih materijala (9, 14).

Ovo istraživanje ispitivalo je odgovor biomehaničkih struktura gornjeg središnjeg sjekutića na opterećenje nakon terapije kompliciranog prijeloma krune zuba u ovisnosti o razvojnom stupnju korijena koristeći metodu konačnih elemenata. Uspoređivale su se četiri različite vrste intrakanalne retencije.

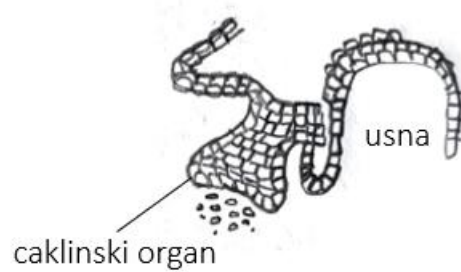
1.1 Rast i razvoj zuba

Proces razvitka zuba započinje stvaranjem zubnog zametka, a završava formiranjem korijena i potpornih struktura. Početak odontogeneze očekuje se u četvrtome tjednu intrauterinog razvoja (8) i kontinuiran je proces bez jasnih prijelaznih stadija koji se zbog lakšeg razumijevanja najčešće dijele na stadij dentalne lamine, stadij pupoljka, stadij kape, stadij zvona, stadij krune, stadij formiranja korijena te stadij erupcije (15). Također, proces odontogeneze može se podijeliti i prema stadijima koje prolaze gradivne stanice na stadij inicijacije, stadij proliferacije, stadij histodiferencijacije i morfodiferencijacije te stadij apozicije i mineralizacije (8).

Do razvoja zuba, kao i kod većine ektodermalnih organa, dolazi kroz niz uzajamnih interakcija između epitela i mezenhimskih stanica. Stanice neuralnog grebena koji potječe od mezenhima djeluju na ektodermalni epitel usne šupljine i razvoj zuba započinje zadebljanjem oralnog epitela odnosno proliferacijom bazalnih stanica epitela usne šupljine u ektomezenhim iz kojeg nastaju dentalna i labiogingivalna lamina. Dentalna lamina tada invaginira u priležeći kranijalni neuralni greben te formira pupoljasta zadebljanja (preteče zuba, zametke, caklinske čvorove). Nastavljanjem proliferacije epitelnog zubnog pupoljka u ektomezenhim nastaju veće strukture koje formiraju dijelove zubnog zametka (stadij kape); caklinski organ iz kojega će se razviti caklina, tkivo unutar invaginacije - zubna papila iz koje će razviti dentin i pulpa te tkivo oko zametka - zubna vreća (dentalni folikul) iz kojega će se razviti potporna tkiva. Epitelne stanice između unutrašnjeg i vanjskog sloja caklinskog organa povezane su zvjezdastom tvorbom poznatom pod nazivom *reticulum stellatum*. Mezenhim se zatim sve više kondenzira i putem ekspresije faktora rasta i transkripcijskih faktora te signalnih molekula stječe sposobnost modeliranja morfogeneze zuba. Nakon toga, epitel se presavija što određuje oblik i broj kvržica te se unutrašnji sloj epitela caklinskog organa diferencira u ameloblaste, a vanjski sloj stanica zubne papile u odontoblaste (stadij zvona). Iznad unutrašnjeg caklinskog epitela nalazi se nekoliko slojeva spljoštenih stanica koje nazivamo stratum intermedium koji ima ulogu u transportu hranjivih tvari do ameloblasta. Zatim u stadiju krune odnosno apozicije i mineralizacije ameloblasti odlažu caklinu (amelogeneza), koja je najtvrdi vanjski sloj krune zuba, dok odontoblasti izlučuju dentinski matriks (dentinogeneza) koji okružuje zubnu pulpu. Početni novostvoreni dentin je nemineraliziran i uglavnom fibrilarne građe, a naziva se predentin. Proces amelogeneze i dentinogeneze odvijaju se uz međusobnu interakciju ameloblasta i odontoblasta. Zajedno, ove stanice pomažu u izgradnji koronarnog dijela zuba (8, 15–19). Rani stadiji razvoja zuba prikazani su na slikama 1 - 5.

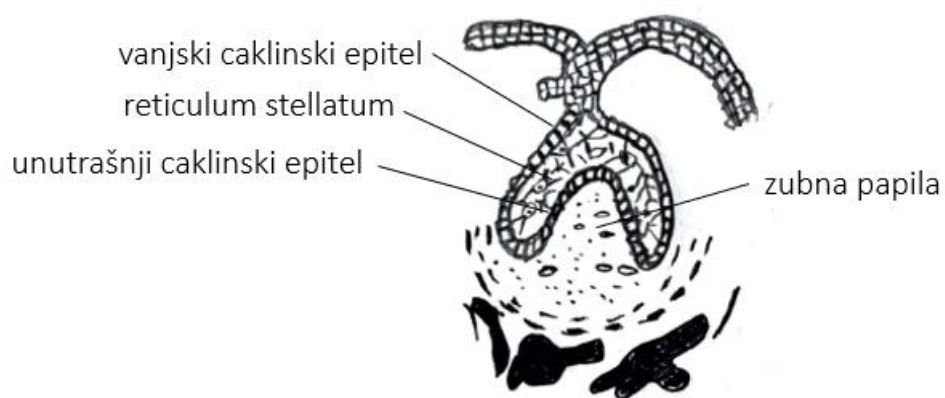


Slika 1. Stadij dentalne lamine.

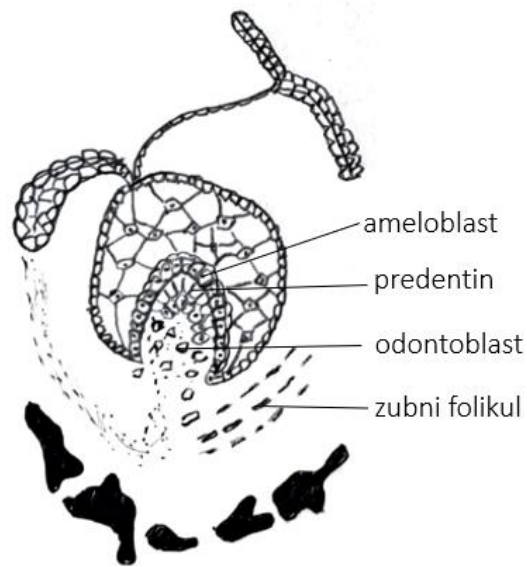


a

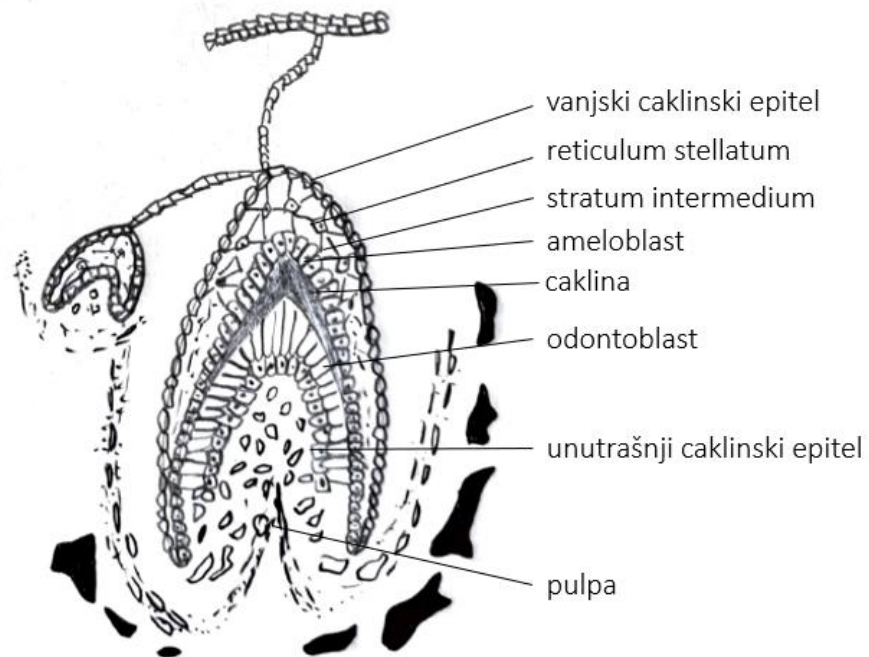
Slika 2. Stadij pupoljka.



Slika 3. Stadij kape.

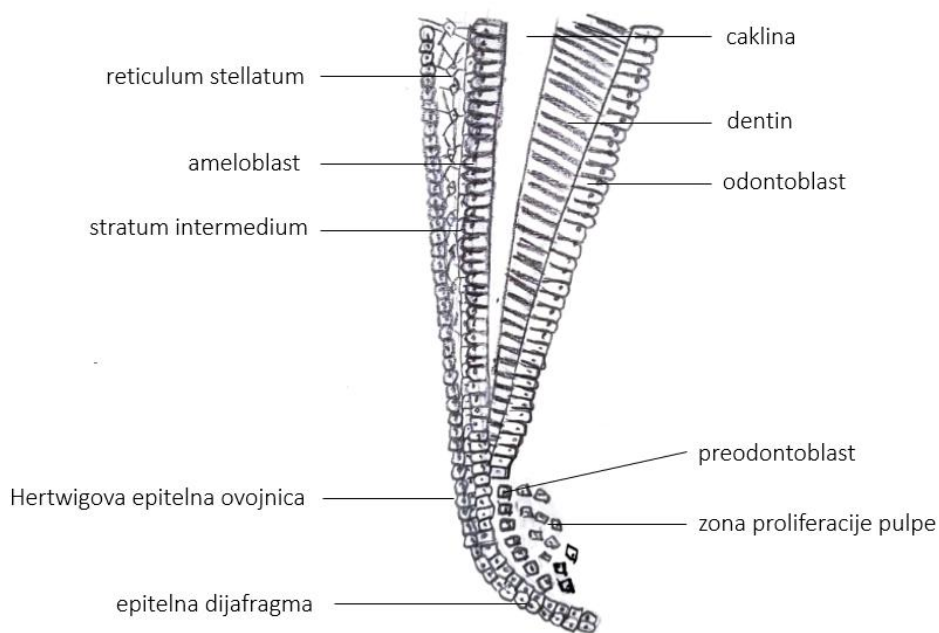


Slika 4. Stadij zvona.

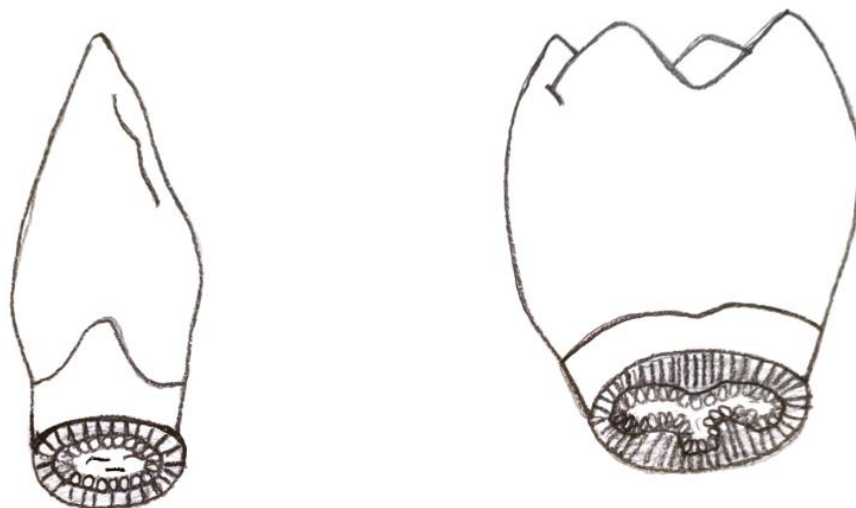


Slika 5. Stadij krune.

Razvoj korijena zuba (slika 6.) započinje nakon formiranja krune odnosno u trenutku kada dentinogeneza i amelogeneza dosegnu razinu cervikalne petlje buduće caklinsko-cementno spojište koje ujedno definira i anatomsku granicu između krune i korijena. Apikalno područje caklinskog organa produljuje se i formira Hertwigovu epitelnu korijensku ovojniju (engl. *Hertwig's epithelial root sheath* (HERS)) dvoslojnu epitelnu strukturu (koja se sastoji od internog i eksternog epitela) između zubne papile i zubnog folikula. Hertwigova ovojnica raste prema apikalno i vodi oblikovanje korijena određujući veličinu, oblik i broj korjenova zuba. Neuralni greben koji potječe iz mezenhima kondenzira se okolo i kontinuirano je u interakciji s Hertwigovom ovojnicom. Nakon toga, mezenhim apikalne papile dolazi u kontakt s unutarnjim slojem Hertwigove ovojnice i diferencira se u odontoblaste koji luče radikularni (korijenski) dentin. Kako raste prema apikalno ovojnica razvija jezik u obliku epitelnih izbočina koje se vodoravno spajaju u most odnosno furkaciju ("epitelna dijafragma") gdje se korijen dijeli čineći tako bazu pulpne komorice (slika 7.). Nakon formiranja furkacije, razvoj korijena u višekorijenskim zubima potaknut je apikalnim rastom Hertwigove ovojnice na isti način kao što se događa i u jednokorijenskim zubima. Ako se kontinuitet Hertwigove ovojnice prerano poremeti ugrožava se diferencijacija odontoblasta korijena što dovodi do poremećaja u razvoju koji utječu na strukturu, oblik, broj, duljinu i druge značajke korijena (8, 15, 17, 18, 20).



Slika 6. Stadij razvoja korijena zuba.





Slika 7. Shema početka razvoja korijena jednokorijenskog i višekorijenskog zuba.

Hertwigova ovojnica sudjeluje i u stvaranju cementa. Nakon njezina dinamičnog kretanja prema apikalnom području zuba Hertwigova ovojnica postaje perforirana lokaliziranom apoptozom ili epitelnomezenhimskom tranzicijom što dovodi do mrežaste strukture. Ta mreža može olakšati kontinuiranu interakciju između epitelnih stanica i njihove kolektivne interakcije s mezenhimom neuralnog grebena, kao i kontakt između stanica zubnog folikula i novonastalog dentina. Nakon indukcije kontakta s dentinom, stanice unutar zubnog folikula diferenciraju se u cementoblaste koji izlučuju proteine ekstracelularnog matriksa specifičnog za cement uključujući i kolagena vlakna. U apikalnom području korijena cementoblasti ostaju ugrađeni u matriks što dovodi do nastanka celularnog cementa. Suprotno tome, ostatak korijena prekriven je acelularnim cementom. I cementoblasti i Hertwigova ovojnica neophodni su za stvaranje cementa. Kada Hertwigova ovojnica ne bude perforirana u ispravnom razvojnom stadiju, stanice zubnog folikula ne mogu doći u kontakt s dentinom što za posljedicu ima promjenu u diferencijaciji cementoblasta, a time i abnormalno stvaranje cementa (17). Hertwigova ovojnica ne degenerira u potpunosti tijekom formiranja korijena. Neki fragmenti mogu zaostati i postaju ostaci epitelnih stanica tzv. Malassezova tjelešca koja u normalnim okolnostima miruju, ali u prisutnosti upale mogu proliferirati, a u nekim slučajevima uzrokovati stvaranje radikularne ciste. Također, mogu doprinijeti u regeneraciji i reparaciji korijenskog dentina i cementa te su od velikog interesa u području regenerativne medicine (18).

Ispravna formacija i degeneracija Hertwigove ovojnice također je presudna i za razvoj parodontnog ligamenta (PDL). Formacija PDL-a započinje migracijom stanica zubnog folikula u dodiru s Hertwigovom ovojnicom između korijena i alveolarne kosti. Ovaj događaj poklapa se s početkom perforacije Hertwigove ovojnice. Tijekom migracije niz citoplazmatskih izdanaka, izvedenih iz mezenhima neuralnog grebena, izvire s prednjih rubova zubnog folikula i počinje lučiti kolagena vlakana. U početku su ta kolagenska vlakna neorganizirana, ali kako razvoj napreduje, oni se zgušnjavaju i postaju uređeni na strukturiran način. Pravilno lučenje i raspodjela kolagenih vlakana doprinose pravilnoj orijentaciji i vezanju PDL-a što je presudno za njegovu sposobnost povezivanja korijena i alveolarne kosti čime se stabilizira zub tijekom mastikacije (17).

Stadij erupcije (nicanja zubi) započinje neposredno nakon početka razvoja korijena i sastoji se od tri faze: preerupcijska u kojoj se kruna zuba pomiče iz svojeg koštanog ležišta kroz kost do sluznice usne šupljine, zatim erupcijska faza u kojoj se zub pojavljuje unutar usne šupljine i dolazi u kontakt sa svojim antagonistima te posterupcijska faza koja se očituje pokretima zubi u čeljusti odnosno promjenama na zubu koji je u funkciji (19). Razvoj korijena nakon nicanja u trajnoj denticiji traje dvije do tri godine kod jednokorijenskih zubi te tri do četiri godine kod višekorijenskih zubi (8). Gornji trajni sjekutić obično niče između sedme i osme godine života (slika 8.) (21) a završetak rasta korijena prema tome može se očekivati između devete i desete godine života, uz napomenu da se stadij razvoja krune i korijena može potvrditi tek nakon rendgenskog nalaza s obzirom na to da su kod svakog pacijenta moguća odstupanja od navedenog vremenskog okvira izazvana preuranjenim ili zakašnjelim nicanjem, morfološkim anomalijama ili patološkim promjenama (19).

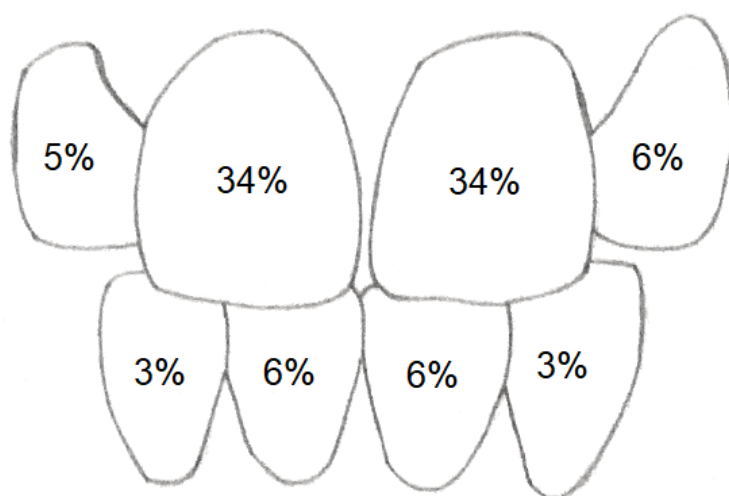
| TRAJNI ZUBI | | |
|---|---|------------------------|
|  | Maksila | Erupcija (god.) |
| | Središnji sjekutić | 7-8 |
| | Lateralni sjekutić | 8-9 |
| | Očnjak | 11-12 |
| | Prvi pretkutnjak | 10-11 |
| | Drugi pretkutnjak | 10-12 |
| | Prvi kutnjak | 6-7 |
| | Drugi kutnjak | 12-13 |
| | Treći kutnjak | 17-21 |
| |  | Mandibula |
| Treći kutnjak | | 17-21 |
| Drugi kutnjak | | 11-13 |
| Prvi kutnjak | | 6-7 |
| Drugi pretkutnjak | | 11-12 |
| Prvi pretkutnjak | | 10-12 |
| Očnjak | | 9-10 |
| Lateralni sjekutić | 7-8 | |
| Središnji sjekutić | 6-7 | |

Slika 8. Nicanje trajne denticije.

1.2 Dentalne traume u djece

Orofacijalna regija čini jedan posto ukupne površine tijela dok oralne ozljede čine pet posto od ukupnih ozljeda na tijelu (7). Otprilike 25% sve djece školske dobi doživi traumu u trajnoj denticiji (22) najviše između osme i desete godine (7). Najveći broj ozljeda nastaje slučajno padom, udarcem čvrstim predmetom ili sudarom s drugim djetetom, zatim u prometu, prilikom bavljenja sportom, kao posljedica nasilja ili zlostavljanja te kao posljedica jatrogenih trauma zuba (poput onih nastalih tijekom otežane oralne intubacije) (8, 23). Piercing na jeziku i usnama nova je vrsta dentalne ozljede koja može dovesti do sitnih fraktura krune tzv. sindroma ispucalog zuba (engl. *cracked tooth*) i/ili recesije gingive (24, 25). Traume su češće kod muškog spola što se može pripisati većem sudjelovanju dječaka u kontaktnim sportovima. Sportske aktivnosti mogu se klasificirati prema riziku nastanka u dvije kategorije: sportovi visokog rizika (hokej na ledu, lacrosse, borilački sportovi, ragbi, klizanje) te sportovi srednjeg rizika (košarka, rukomet, ronjenje, squash, gimnastika, padobranstvo, vaterpolo) (26).

U najvećem broju slučajeva dentalna traumatska ozljeda zahvaća gornji središnji sjekutić, zatim donji središnji sjekutić, gornji lateralni sjekutić i donji lateralni sjekutić (slika 9.) (8). Isto vrijedi i za mliječnu denticiju. Tipična dentalna traumatska ozljeda zahvaća jedan zub, osim kod sportskih i prometnih nesreća koje su predisponirane za multiplu dentalnu ozljedu (27).

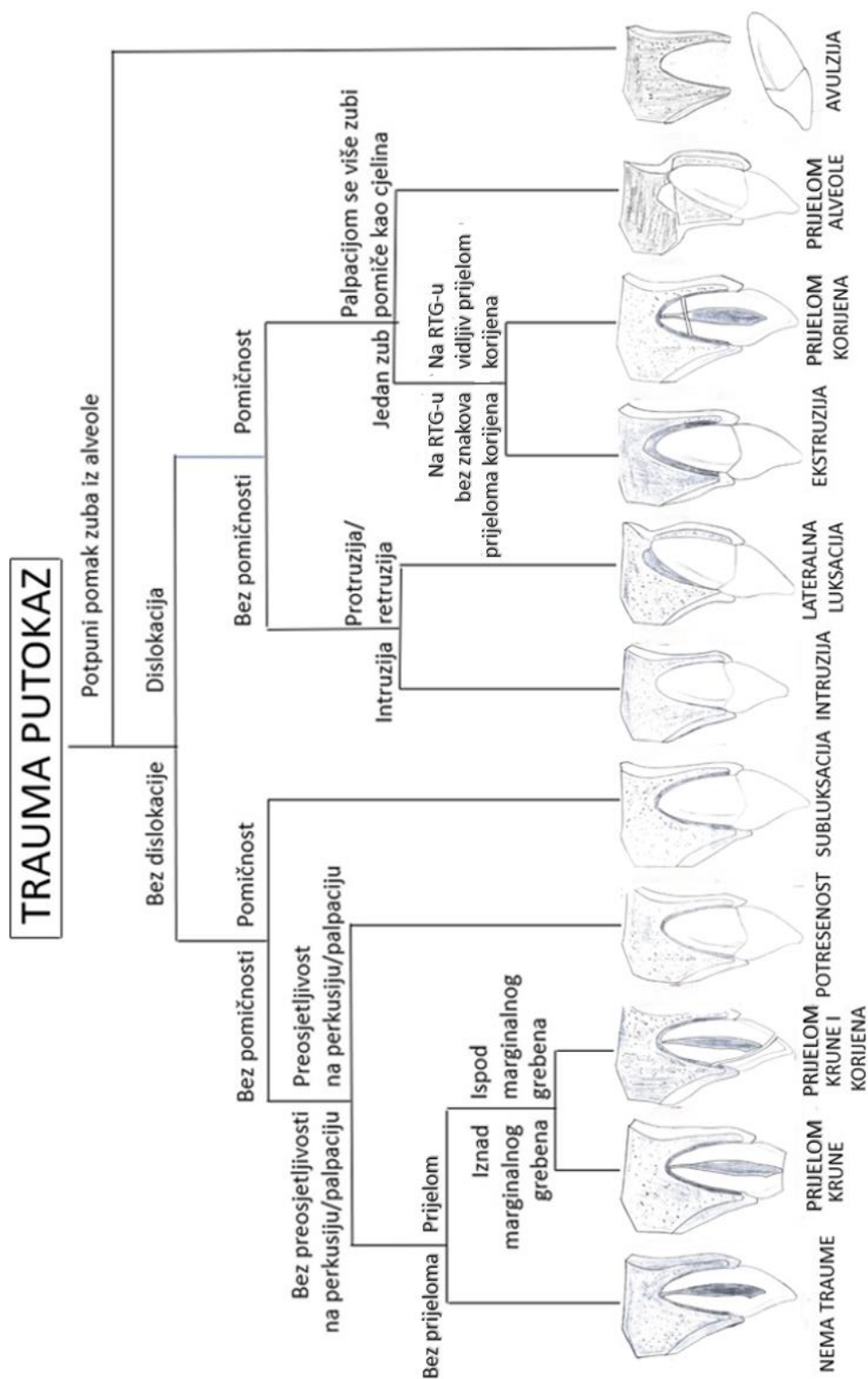


Slika 9. Zahvaćenost pojedinog zuba traumom u prednjem segmentu u postocima.

Dentalna trauma rezultat je direktnog ili indirektnog udarca. Kod direktnog udarca u zube najčešće dolazi do traumatske ozljede na prednjim zubima. Neizravna dentalna trauma najčešće je posljedica udarca u bradu ili trzajne ozljede prilikom kojih dolazi do prisilnog zatvaranja donje čeljusti i udarca u gornju čeljust što često dovodi do vertikalnih fraktura pretkutnjaka i kutnjaka kao i fraktura mandibularnog kondila ili simfiza (28, 29). Udarci male brzine obično uzrokuju ozljede potpornih tkiva dok udarci velike brzine obično uzrokuju ozljede na zubima. Više faktora određuje destruktivnu prirodu dentalnih traumatskih ozljeda: energija udarca, elastičnost udarnog objekta, oblik udarnog objekta te smjer udarne sile (30).

Najčešće se upotrebljava klasifikacija dentalnih ozljeda prema Andreasenu, koju prihvaća Svjetska zdravstvena organizacija, koja razlikuje ozljede tvrdih zubna tkiva i pulpe (infrakcija cakline, prijelom cakline, prijelom cakline i dentina, komplicirani prijelom krune, prijelom korijena, prijelom krune i korijena), ozljede parodontnih tkiva (potresenost, subluksacija, ekstruzijska luksacija, lateralna luksacija, intruzijska luksacija, avulzija), ozljede potporne kosti (prijelom mandibularne ili maksilarne stjenke alveole, prijelom mandibularnog ili maksilarnog alveolarnog nastavka) te ozljede gingive i oralne sluznice (laceracija, kontuzija, abrazija) (7, 31). Na slici 10. prikazan je putokaz za usmjeravanje kliničara pri dijagnosticiranju dentalne traume.

Dentalne traume javnozdravstveni su problem širom svijeta (22). Ne samo liječnik, već i roditelji, učitelji i treneri moraju imati osnovno znanje o hitnom zbrinjavanju dentalne traume. Uporaba štitnika i sportskih udloga te u nekim sportovima i kaciga sa štitnikom za lice značajno smanjuje prevalenciju dentoalveolarnih trauma (28).



Slika 10. Putokaz za usmjeravanje kliničara pri dijagnosticiranju dentalne traume. Preuzeto i prilagođeno iz (32).

1.2.1 Komplikirani prijelom krune na gornjem mladom trajnom središnjem sjekutiću

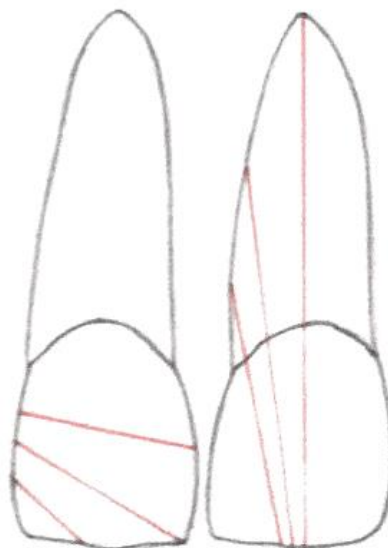
Trauma može prouzročiti širok raspon oštećenja na prednjim zubima, u rasponu od blage luksacije do velikih gubitaka zubne strukture zbog prijeloma krune i/ili korijena te težih luksacijskih ozljeda poput intruzije i avulzije zuba. Plan liječenja ovih ozljeda trebao bi imati dugoročnu prognozu uzimajući u obzir početnu terapiju, kontrolu boli, funkciju i estetiku te moguće uzroke neuspjeha i njihove posljedice na buduće liječenje koje često traje tijekom više desetljeća (33).

Gornji središnji sjekutić zub je najčešće zahvaćen traumom prilikom koje najčešće dolazi do prijeloma krune zuba (25, 34, 35). Predisponirajući čimbenici povezani su s anatomskim karakteristikama pacijenta kao što su ortodonska klasa II. s protruzijom prednje fronte (*overjet* veći od tri milimetra) te visoko položena gornja usna odnosno *gummy smile* zbog kojih izostaje zaštitni mehanizam i češće dolazi do ozljede zuba (slika 11.) (26).



Slika 11. a) pacijent s protruzijom gornje fronte; b) pacijentica s visoko položenom gornjom usnom.

Prijelom krune može biti nekompliciran ili kompliciran odnosno bez ili sa zahvaćenom pulpom. Prijelomna linija može biti kosa, horizontalna ili vertikalna (slika 12.). Najčešće dolazi do kosih prijeloma koje mogu varirati od manjeg gubitka incizalnog kuta do gubitka i više od polovine krune zuba s eskponiranjem pulpe (slika 13.) ili kombinacijom prijeloma krune i korijena. U slučaju vertikalnog prijeloma zub je nepovratno izgubljen (30).



Slika 12. Prikaz prijelomnih linija.



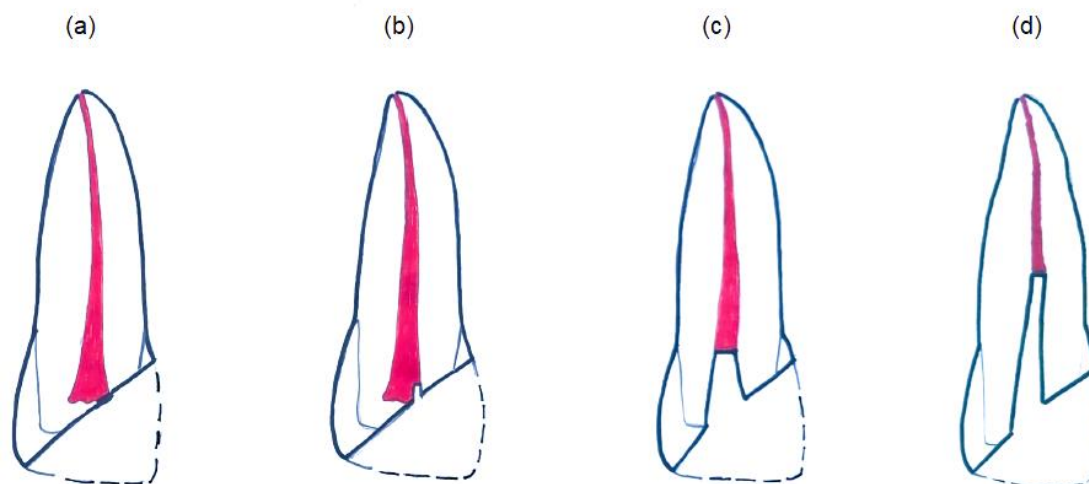
Slika 13. Komplicirani prijelom krune zuba 11.

Zub s kompliciranim prijelomom krune može istovremeno imati i luksacijsku ozljedu ili prijelom korijena. Zato je, kao i za sve traumatske ozljede, neophodan rendgenski nalaz kako bi se potvrdile ili isključile dodatne ozljede ili periapikalna patološka stanja, procijenio stupanj razvoja korijena i moguće morfološke anomalije ili ozljede na susjednim zubima što se ne može evidentirati na kliničkom pregledu (36). Primarni je cilj liječenja održati vitalnost pulpe, a zatim vratiti normalnu estetiku i funkciju (34). Terapijski postupci na mladim trajni zubima uključuju direktno prekrivanje pulpe, parcijalnu pulpotomiju po Cveku, cervikalnu pulpotomiju, visoku amputaciju pulpe, pulpektomiju uz obavezni postupak apeksifikacije te u novije vrijeme postupak revaskularizacije (8).

Prognoza prijeloma krune ovisi prvenstveno o popratnoj ozljedi parodontnog ligamenta, zatim o vremenu izloženosti eksponirane pulpe, opsegu eksponiranog dentina te stadiju razvoja korijena u trenutku nastanka ozljede (34, 37). Direktno prekrivanje pulpe provodi se kad je pulpa eksponirana manje od 24 sata, ima točkasti otvor pulpe (jedan milimetar) i zub je asiptomatski. U slučaju sumnje na površinsku kontaminaciju uklanja se milimetar i pol do dva milimetra pulpnog tkiva u dubinu odnosno provodi se parcijalna pulpotomija po Cveku. U slučaju neuspjelog zaustavljanja krvarenja ili dulje eksponiranosti, do 72 sata, provodi se cervikalna pulpotomija odnosno uklanja se cijela koronarna pulpa do razine radikularne pulpe. Neki autori nakon izloženosti pulpe veće od 72 sata zagovaraju i visoku amputaciju (8) (slika 14.).

Stopa preživljavanja pulpe kod kompliciranog prijeloma krune varira od 32% do 94% (38). Nekroza pulpe povezana je s opsegom oštećenja neurovaskularne opskrbe pulpe. Izolirani prijelom krune sam po sebi nosi nizak rizik od nekroze pulpe ako je osigurano odgovarajuće i pravovremeno liječenje. Kada to nije slučaj, linija prijeloma djeluje kao put za prodor bakterija u pulpu. Ako se prijelom krune i blaža luksacijska ozljeda poput subluskacije dogode istovremeno, obrambeni mehanizmi pulpe postat će manje učinkoviti. Istodobna luksacijska ozljeda povećat će prevalenciju nekroze pulpe zbog oštećenja neurovaskularne opskrbe u području apeksa zuba te zbog prodora infekcije kroz oštećeni parodont (26). Endodontsko liječenje potrebno je kada su svi naponi da se očuva vitalitet neuspješni ili pacijent već ima takvo stanje. Prognoza uspješnosti u tom slučaju najviše ovisi o zatečenom stupnju stadija rasta i razvoja korijena (8).

Niska razina svijesti opće javnosti često dovodi do odgađanja odnosno kašnjenja u potrazi za liječenjem što često dovodi do bolova, težih simptoma, komplikacija i općenito lošije prognoze (23).



Slika 14. Terapijski postupci očuvanja vitaliteta kod kompliciranog prijeloma krune:

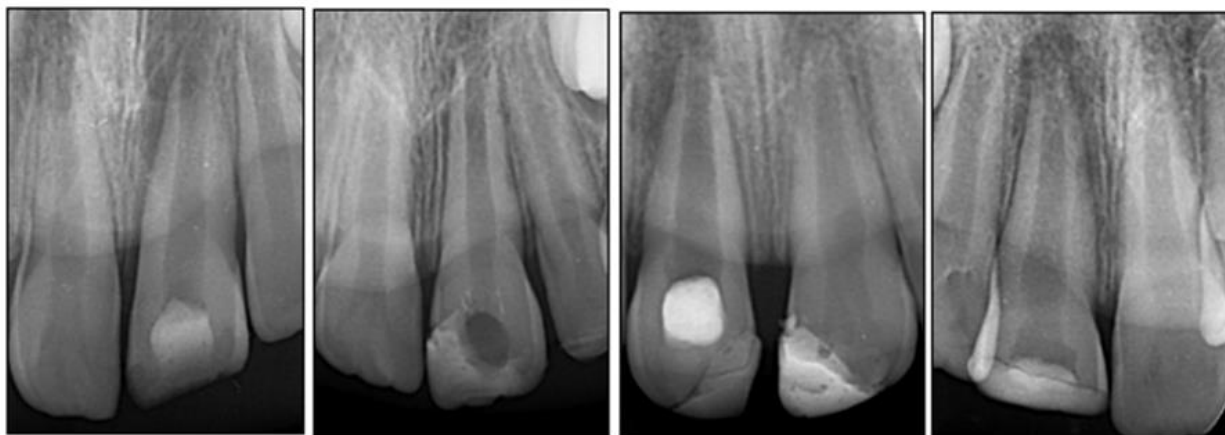
- (a) Direktno prekrivanje pulpe
- (b) Parcijalna pulpotomija po Cveku
- (c) Cervikalna pulpotomija
- (d) Visoka amputacija pulpe

1.3 Terapija avitalnoga mladog trajnog zuba

Nekroza pulpe kod mladoga trajnog zuba dovodi do zastoja u razvoju korijena. Takav korijen ima otvoren apeks te tanke stjenke dentina što stvara endodonske i restaurativne izazove za kliničare (slika 15.) (39). Ti su zubi krhki i posebno skloni frakturama (40–42). Također, narušeni omjer krune i korijena dodatno ugrožava stabilnost zuba (43).

Količina preostale koronarne strukture i rezidualna debljina dentina korijena presudni su čimbenici koji određuju vrstu konačne restauracije. Kada je koronarno oštećenje minimalno, nije potrebna dodatna retencija postavom kolčića unutar korijenskog kanala. Međutim, kod ozbiljno oštećene koronarne strukture prihvaćenije je mišljenje da se postavom kolčića osigurava dovoljna retencija za jezgru (39).

Prema tome, terapija se može podijeliti na vrlo zahtjevno endodonsko liječenje te poslijeendodonsku opskrbu zuba kojom se nastoji ponovno uspostaviti funkcija i estetika zuba te što pozitivnije djelovati na psihosocijalno zdravlje djeteta.



Slika 15. Radiološki nalaz mladih trajnih avitalnih zubi s nezavršenim rastom i razvojem korijena nakon komplicirane frakture krune.

1.3.1 Endodontska terapija

Endodontsko liječenje mladih trajnih zuba s otvorenim apeksom i nekrotičnom pulpom smatra se jednim od najsloženijih izazova za kliničare (39–41,43–45) (slika 16.). Vrlo je teško provesti pravilnu mehaničku i kemijsku obradu kanala a da se pritom izbjegne prekomjerno stanjivanje već oslabljenih dentinskih stjenki. Također, široko otvoren apikalni foramen otežava zadržavanje materijala za punjenje unutar korijenskog kanala (44). Pacijenti su djeca koja su u dobi od sedme do desete godine života vrlo često nespremna na zahvat (8). Čak i nakon završene terapije takvi zubi i dalje imaju povećanu osjetljivost na lom kod fizioloških sila žvakanja (39, 41). Sve ove karakteristike ugrožavaju dugoročno zdravlje zuba.



Slika 16. Radiološki nalaz nakon provedenog endodontskog liječenja na mladom trajnom zubu s nezavršenim rastom i razvojem korijena nakon dentalne traume.

Tradicionalno se dugi niz godina na mladim trajnim avitalnim zubima provodio postupak apeksifikacije višeposjetnim izmjenama paste od kalcijeva hidroksida dok ne bi nastala apikalna kalcificirana barijera nakon čega bi uslijedilo konvencionalno punjenje korijenskog kanala (46). Zbog proteolitičkog učinka kalcijeva hidroksida, takva dugotrajna terapija dodatno bi oslabila preostale tanke dentinske stjenke te se metoda sve manje koristi u kliničkom radu (40, 43). Druga je mogućnost u liječenju mladih trajnih avitalnih zuba stvaranje umjetne apikalne barijere postavljanjem mineral trioksid agregata (MTA) u područje apeksa zuba (slika 17.), odnosno

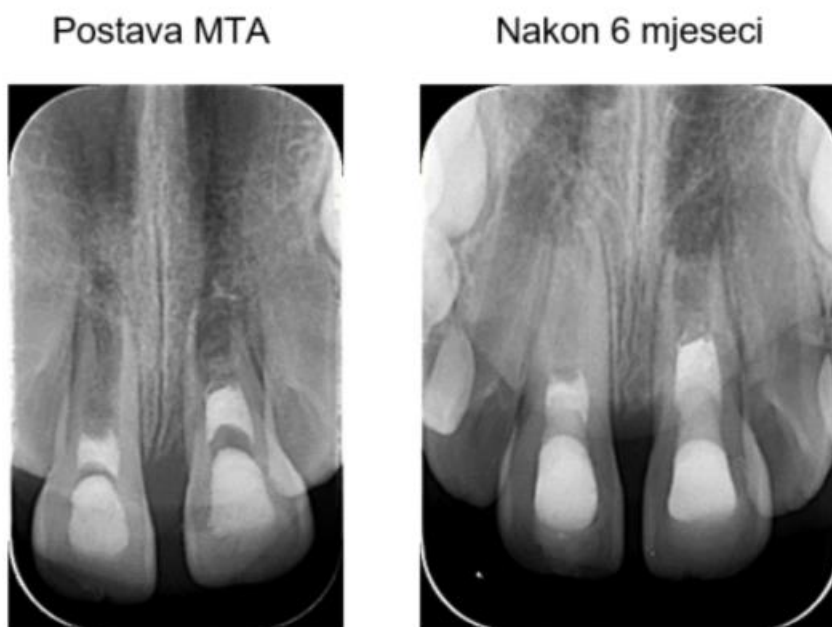
formiranje apikalnog čepa, uz napomenu kako je manipulacija i postavljanje materijala u formi „apikalnog stopa“ vrlo teška (46). Nažalost ni ova metoda nije donijela poboljšanje u frakturnoj otpornosti oslabljenog zuba (47). U dvadesetogodišnjoj longitudinalnoj studiji Wikström i sur. (48) stopa preživljavanja bila je 10 godina za apeksifikaciju kalcijevim hidroksidom te 16,1 za MTA-apikalni stop.

Posljednjih je godina regenerativno endodontsko liječenje (engl. *Regenerative Endodontic treatments* (RETs)) predloženo kao alternativa tehnikama apeksifikacije (slika 18). Temelji se na sposobnosti diferencijacije rezidualne pulpe, apikalnih i parodontnih matičnih stanica. Potaknutim krvarenjem iz periapeksa te stanice koloniziraju raspoloživi prostor pulpe te stvaraju visoko vaskularizirano vezivno tkivo u kojem se naknadno diferenciraju novoformirani odontoblasti, osteoblasti i/ili cementoblasti koji induciraju apoziciju tvrdog tkiva što omogućuje stimulaciju razvoja apeksa i sazrijevanje korijena (rast korijena i zadebljanje dentinskih stjenki) odnosno prirodnu apeksifikaciju (49). Osnovne razlike u odnosu na konvencionalnu endodontsku terapiju su: obilno ispiranje korijenskog kanala bez mehaničkog čišćenja, uporaba dvoantibiotske paste, provocirano krvarenje iz periapeksa u korijenski kanal te prekrivanje koagulumom bioaktivnim materijalom najčešće postavom MTA u cervikalnu trećinu korijenskog kanala (46). Međutim, RETs se još uvijek ne preporučuju kao zlatni standard jer ne postoji dovoljno dokaza o ukupnoj učinkovitosti u liječenju traumatiziranih nezrelih zuba s nekrozom pulpe i infekcijom (48) iako u kliničkom radu pokazuju jako dobre rezultate (50, 51). Također, takav terapijski postupak isključuje mogućnost postave intrakanalne retencije koja se često zahtijeva u rekonstrukciji komplicirane frakture krune zuba (8). Namour i sur. (49) u svojem su preglednom istraživanju predložili novi protokol u liječenju mladih trajnih zuba s nekrozom pulpe s obzirom na stadij rasta i razvoja korijena po Cveku. Regenerativne endodontske postupke predlažu u prvom, drugom i trećem stadiju razvoja po Cveku. Ovisno o debljini korijenskog dentina u četvrtom stadiju preporučuju provođenje postupka apeksifikacije ili RETs, a u petom stadiju preporučuju konvencionalno endodontsko liječenje.

Primarni je cilj svakog postupka uklanjanje kliničkih simptoma apikalnog periodontitisa, a zatim i potpuna rezolucija upale, nakon čega je dodatni cilj zadebljanje dentinskih stjenki i/ili nastavak razvoja korijena odnosno očuvanje zuba (52, 53). Kliničar bi trebao razmotriti sve mogućnosti liječenja te imati dugoročan plan s obzirom na prognozu uspješnosti predviđenog postupka.



Slika 17. Radiološki nalaz postavljenog MTA apikalnog stopa u distalni kanal na zubu 47 nezavršenog razvoja korijena.



Slika 18. Radiološki nalaz provedenog postupka revaskularizacije na gornjim središnjim avitalnim sjekutićima postavom MTA u srednju trećinu korijenskog kanala nakon dentalne traume koja ne zahtijeva postavu intrakanalne retencije.

1.3.2 Postendodontska opskrba zuba

U literaturi se često navodi kako endodontski liječeni zubi imaju veći rizik od biomehaničkog neuspjeha za razliku od vitalnih zubi (54–57). Nekada se vjerovalo da su promjene u dentinu zuba, kao što su smanjeni sadržaj vlage i smanjeno umrežavanje kolagena, vodeći uzroci prijeloma kod avitalnih zuba, međutim, pokazalo se da su prvenstveno uzrokovani promjenama u strukturnom integritetu zuba (58). Zanimljivo je kako endodontski zahvati zapravo smanjuju krutost zuba za samo pet posto, prvenstveno zbog pristupnog otvora, dok uklanjanje strukture zuba u mezo-okluzo-distalnoj (MOD) preparaciji smanjuje krutost zuba za čak 60% (59, 60). Kada se to odnosi na mlade trajne zube zahvaćene dentalnom traumom, tada je strukturni integritet zuba ozbiljno narušen. Prema tome prognoza zuba ne ovisi samo o uspjehu endodontskog liječenja već i o načinu postendodontske rekonstrukcije krune zuba. To se najvećim dijelom odnosi na pravilno postavljenu indikaciju o postavi intrakanalne retencije te zatim o izboru odgovarajućeg materijala odnosno odabiru odgovarajućeg sustava kolčića i jezgre (61).

Planiranje postendodontske opskrbe zuba kod komplicirane frakture krune zuba ovisi o raznim čimbenicima kao što su mjesto linije prijeloma, biološka širina, stadij razvoja korijena, udružena luksacijska ozljeda ili fraktura alveolarne kosti, ozljede mekog tkiva, okluzija i estetika (62).

1.3.2.1 Intrakanalna retencija

Glavna je svrha kolčića osigurati retenciju za jezgri materijal kada nema dovoljno preostale kliničke krune (54, 55, 57, 61, 63–67). Retencijska sposobnost i količina naprezanja koja nastaje tijekom postavljanja kolčića važni su čimbenici koje treba uzeti u obzir pri odabiru sustava (55). Vjerojatnost da će avitalni zub preživjeti izravno je vezana za količinu i kvalitetu preostalog tkiva te je zato prezervacija zdrave strukture zuba od presudne važnosti (55, 64, 68).

Intrakanalne kolčiće možemo podijeliti prema načinu izrade na individualne i konfekcijske, a prema materijalu od kojih su izrađeni na metalne i bezmetalne odnosno estetske. Dizajn kolčića može se podijeliti prema karakteristikama površine i oblika. S obzirom na površinu, kolčići mogu biti aktivni ili pasivni. Aktivni kolčić ima navoje koji mehanički zahvaćaju dentin. Pasivni kolčić ima glatku površinu i njegova prilagodba unutar korijenskog kanala ovisi o cementu i jezgri materijala. Oblik kolčića može biti cilindričan, koničan ili kombinacija. Kolčići s paralelnim

stranicama imaju bolju retenciju od koničnih kolčića jer ravnomjernije raspodjeljuju uzdužno naprezanje tijekom funkcije: što je veći konicitet, to je manja retencija. No, kombinirani oblik odnosno paralelno konusni oblik poželjniji je unutar korijenskog kanala jer omogućava očuvanje dentina na vrhu i istovremeno postiže dovoljnu retenciju. Cilindrična osnova postavlja se u koronarni dio korijena u kojem je preostala zubna struktura veća nego u apikalnom dijelu korijena gdje se postavlja konični dio ili vrh kolčića ovisno o proizvođaču. Konicitet u apikalnom dijelu kolčića smanjuje koncentraciju naprezanja u tom dijelu korijena te prirodnije prati anatomiju samog korijena zuba (57, 61, 65). U početku je preporuka bila ta da duljina kolčića bude jednaka dvije trećine duljine korijenskog kanala ili barem jednaka duljini krune zuba kako bi se izbjegla pretjerana unutarnja naprezanja u korijenu, dok je za današnje sustave kompozitnih kolčića i jezgre dovoljna duljina do pola korijenskog kanala (61, 69, 70). Također, promjer kolčića ne bi trebao biti veći od jedne trećine promjera korijena na caklinsko cementnom spojištu odnosno na svakom dijelu korijena, a sami vrh kolčića trebao bi imati promjer jedan milimetar ili manje (71). Zato je prije postave kolčića, potrebno pregledati i analizirati razne čimbenike kao što su okluzija, položaj zuba u luku, količina preostalog zubnog tkiva, konfiguracija odnosno anatomija, oblik i promjer korijenskog kanala (72).

Kontraindikacije za postavu intrakanalne retencije neuspješno su endodontsko liječenje, zubi s lošom i nesigurnom prognozom, povećana pokretljivost zuba, zubi s krhkim/fragilnim korijenom te zubi s dovoljno preostale strukture za retenciju restauracije (61).

1.3.2.1.1 Esteska intrakanalna retencija

Estetski odnosno nemetalni kolčići uvedeni su primarno kako bi se odgovorilo na potrebu veće estetike na prednjim zubima što je zatim dovelo do revolucije u stomatologiji i uvođenju novih biokompatibilnih sustava kod kojih je najvažnija značajka njihov niži modul elastičnosti zbog čega su skoro u potpunosti istisnuli metalne kolčiće iz upotrebe (54, 61, 73). Razvoj dentalnih materijala iz temelja je izmijenio koncept sustava kolčića i jezgre dopuštajući promjenu s mehanički retiniranih na adhezivno vezujuće (58).

Dostupan je širok raspon estetskih nemetalnih kolčića koji se ponašaju slično kao dentin i pokazuju slične obrasce razvoja naprezanja pod vanjskim utjecajima. Slijedom toga, komplikacije povezane s novim sustavima promatrane su kao manje katastrofalne, što uglavnom uključuje

popravljive probleme poput odvajanja kolčića od zuba ili frakture zuba iznad razine kosti (54, 65, 74).

1.3.2.1.1.1 Kompozitni intrakanalni kolčići ojačani vlaknima

Kompozitni intrakanalni kolčići ojačani vlaknima (engl. *fiber reinforced composite post* (FRC)) primjenjuju se svakodnevno u kliničkom radu zbog svojih brojnih prednosti kao što su biokompatibilnost, estetska svojstva, mehanička svojstava slična dentinu, otpornost na koroziju, adhezivno vezanje, jednodijelna tehnika primjene te mogućnost jednostavnog uklanjanja kolčića iz korijenskog kanala (75). Imaju ravnomjerniju raspodjelu naprezanja od ostalih sustava zbog sličnog modula elastičnosti dentinu, smanjujući time incidenciju prijeloma korijena nakon postave restauracije (54). Kompozitni kolčići sastoje se od jednosmjernih vlakana (ugljika, kvarca ili stakla) ugrađenih u matricu od smole (epoksidna smola ili metakrilatna smola). Vlakna su odgovorna za otpor protiv savijanja, dok matrica smole pruža otpor na kompresiju te također tvori površinu s kojom će funkcionalni monomeri sadržani u adhezivnim cementima stupiti u interakciju (64). Dijelimo ih na kompozitne kolčiće ojačane karbonskim vlaknima, prefabricirane kompozitne kolčiće ojačane staklenim ili kvarcnim vlaknima, individualne kompozitne kolčiće ojačane staklenim vlaknima te kompozitne kolčiće ojačane polietilenskim vlaknima (61).

Kompozitni kolčići ojačani karbonskim vlaknima ne mogu se klasificirati kao tipični estetski kolčići zbog njihove tamne boje i teškog prikrivanja ispod potpuno keramičkih ili kompozitnih restauracija zbog čega nisu stekli popularnost u kliničkom radu. U svrhu prevladavanja tog nedostatka dostupni su presvučeni (engl. *coated*) kolčići. Također, adhezijsko svezivanje slabije je za razliku od ostalih kompozitnih kolčića (61).

Danas se najčešće koriste prefabricirani kompozitni kolčići ojačani staklenim vlaknima (slika 19.) koji osim izvrsnih estetskih svojstava adhezivnim svezivanjem na tvrda zubna tkiva pospješuju stvaranje monobloka (76–78). Staklena vlakna omogućuju visoku razinu vlačne čvrstoće, a matriks smole trebao bi izdržati tlačno naprezanje i apsorbirati naprezanja u cijelom sustavu kolčića (61). Staklena se vlakna pod opterećenjem rastežu ravnomjerno do njihove točke loma te se u slučaju prestanka djelovanja vlačne sile manje od sile loma vlakna vraćaju na izvornu duljinu (76). Glavni je uzrok neuspjeha gubitak retencije. Nekoliko čimbenika utječe na kvalitetu adhezije: tehnika nanošenja adheziva, anatomija korijena, nepovoljna konfiguracija kaviteta, tehnika polimerizacije, vještina i iskustvo kliničara (79). Ne postoji standardan protokol za postavu

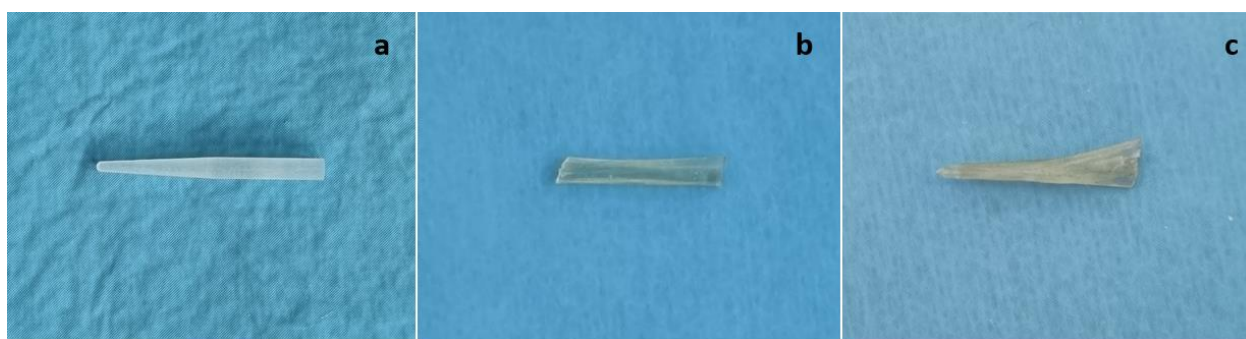
i površinsku obradu kolčića koji može osigurati veću trajnost. Upotreba fosforne kiseline i vodikova peroksida brza je tehnika koja može povećati retenciju kod nekih sustava. Većina studija pokazala je kako površinska primjena silana ne poboljšava adheziju. Ne preporučuje se upotreba fluorovodonične kiseline jer uvelike oštećuje površinu kolčića (77). Mikromehanička pretpovršinska obrada zračnom abrazijom može značajno poboljšati retenciju zbog stvorene hrapavosti. Također, ne preporučuje se postaviti deblji sloj adhezivnog cementa jer može dovesti do nepovoljne raspodjele naprezanja na dodirnoj površini s dentinom i time smanjiti retenciju (78). Adhezija za intraradikularni dentin tehnički je osjetljiv postupak koji je danas pojednostavljen primjenom samoadhezivnih kompozitnih cemenata koji ne zahtijevaju predtretman korijenskog dentina (79). Glavni je nedostatak prefabriciranih kompozitnih kolčića njihovo neprilagođavanje obliku anatomije korijenskog kanala. Dolaze u sustavu sa specijalno kalibriranim svrdlima za preoblikovanje korijenskog kanala što dovodi do dodatnog uklanjanja radikularnog dentina ili do neadekvatne preparacije s povećanom debljinom kompozitnog cementa (67) zbog čega je među kliničarima poznata rasprava o samoj korisnosti postave kolčića poznata pod nazivom "*To post or not to post?*" (80–82).

Kompozitni kolčići ojačani polietilenskim vlaknima sastoje se od plazmom tretiranih polietilenskih vlakana ultravisoke molekularne mase upletenih u trodimenzionalnu strukturu (76). Smatraju se jednim od najizdržljivijih dostupnih vlakana za ojačavanje, ali bez obzira na odlične karakteristike visoka cijena ograničava njihovu upotrebu u svakodnevnom kliničkom radu (61, 65, 83).

Individualni kompozitni kolčići ojačani staklenim vlaknima (slika 19.) temelje se na minimiziranju potrebe za dodatnom preparacijom dentina, a istovremeno omogućuju dodavanje većih količina materijala. Na ovaj se način čuva dentin, smanjuje naprezanje u apikalnom dijelu kolčića i postiže bolja otpornost na lom kod kolčića s većim promjerom što daje snažnu potporu jezgri za razliku od prefabriciranih kompozitnih kolčića koji zahtijevaju preparaciju korijenskog kanala (61, 84). Također, polimerna je matrica između vlakana kod prefabriciranih kompozitnih kolčića visokoumrežena i ima nisku reaktivnost odnosno kemijski je inertna bez interaktivnih funkcionalnih skupina za vezanje s kompozitnim cementom i jezgrom (73). Pritom polimerna matrica kod individualnih kompozitnih kolčića ojačanih staklom sadrži kombinaciju nepolimeriziranih linearnih i umreženih vlakana tvoreći djelomično interpenetrirajuću polimernu mrežu (IPN) kod koje se penetriranjem monomera kompozitnog cementa tvori sekundarni IPN i

ostvaruje jaka kemijska veza te reducira mikropropuštanje (84). Nopolimerizirana su vlakna mekana te se lako oblikuju prema obliku korijenskog kanala što je dodatna prednost.

Individualni kompozitni kolčići indicirani su kod korijenskih kanala koji zahtijevaju puno veći promjer kolčića od uobičajenog kao što su mladi trajni zubi s nezavršenim rastom i razvojem korijena te zubi s velikom strukturnom destrukcijom uzrokovanom traumom, opsežnom karijesnom lezijom ili prekomjernom preparacijom prilikom endodontskog liječenja. Također, mogu se koristiti u kombinaciji s prefabriciranim kompozitnim kolčićima za bolju manipulaciju i oblikovanje unutar korijenskog kanala.



Slika 19. a) prefabricirani kompozitni kolčić ojačan staklenim vlaknima; b) individualni kompozitni kolčić ojačan staklenim vlaknima prije polimerizacije; c) individualni kompozitni kolčić ojačan staklenim vlaknima nakon polimerizacije unutar korijenskog kanala.

1.3.2.1.1.2 Cirkonij-oksidni intrakanalni kolčići

Keramički kolčići temeljeni na cirkonij-oksidnoj keramici pokazuju izvrsnu kemijsku stabilnost, dobra estetska i fizikalna svojstva, dobar radiopacitet te vrhunsku translucenciju (61). Indicirani su kod oslabljenih i opsežno destruiranih struktura zuba. Također, u slučajevima visokih estetskih zahtjeva kao kod pacijenata s tankom gingivom ili visoko položenom gornjom usnom (*gummy smile*) (66). U kombinaciji s potpuno keramičkom krunicom maksimalno optimiziraju estetski učinak. Međutim, uočene su česte frakture korijena zbog visokog modula elastičnosti cirkonskih kolčića - 200 GPa (61). Također, u slučaju potrebe za ponavljanjem endodontskog postupka otežano je i vrlo često neuspješno uklanjanje kolčića iz korijenskog kanala zbog visoke krutosti i krhkosti što je njihov velik nedostatak (61, 65, 85). Kontraindicirani su kod pacijenata s dijagnosticiranim bruksizmom (85).

1.3.2.1.2 Metalna intrakanalna retencija

Lijevane metalne nadogradnje (slika 20.) i prefabricirani metalni kolčići (slika 21.) imaju dugu povijest uspješne primjene zbog svojih superiornih fizičko mehaničkih svojstava (45). Međutim, estetski nedostaci i visoki modul elastičnosti koji uzrokuje koncentracije naprezanja unutar radikularnog dentina bili su glavni razlozi razvoja više estetskih i biokompatibilnijih materijala. Također, upotreba metalnih kolčića povezana je s visokom postotkom fraktura ispod razine kosti odnosno nepopravljivih fraktura za razliku od estetskih kolčića sa sličnijim modulom elastičnosti dentinu kod kojih su češće frakture iznad razine kosti (86, 87).

Lijevane metalne nadogradnje imaju prednost prilagođavanja morfologiji kanala te su i dalje indicirane u slučajevima velikog gubitka koronarnog tkiva na stražnjim zubima (primarno kutnjacima) i kada je potrebna promjena u angulaciji jezgre (88).



Slika 20. Lijevana metalna individualna nadogradnja za jednokorijenski zub



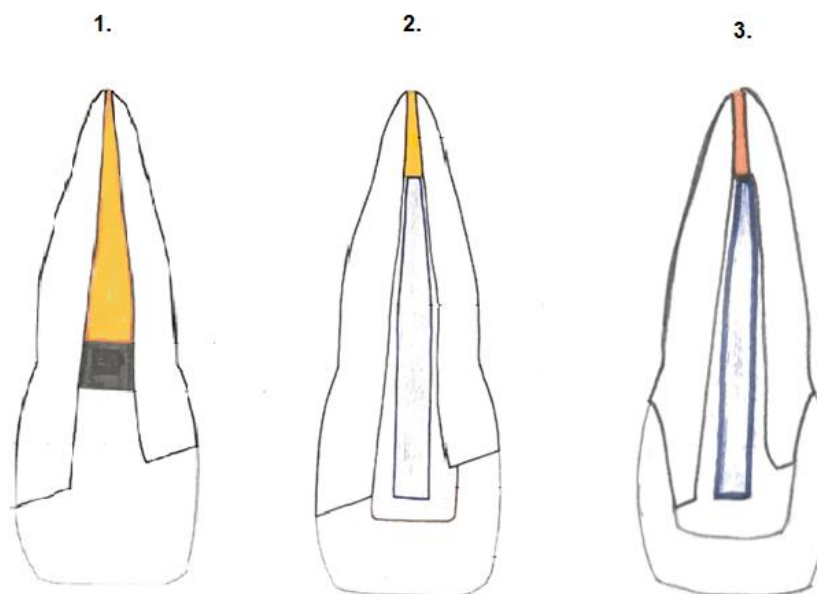
Slika 21. Konfekcijski metalni kolčići

1.3.2.2 Restaurativna terapija

Nakon liječenja korijenskog kanala potrebno je obnoviti narušeni oblik, funkciju i estetiku mladog trajnog zuba. Restaurativni nadomjestak mora imati odgovarajuću retenciju bez daljnjeg oštećenja preostalog zubnog tkiva te mora spriječiti mikropropuštanje bakterija i moguće prijelome korijena (70, 89). Adhezivni pristup u potpunosti je promijenio obnovu endodontski liječenih zubi (82). U početku se koristio jetkajuće ispirući sustav u više koraka koji je pružao pouzdanu adheziju na dentin, ali je zahtijevao kontrolu vlažnosti te više koraka zbog kojih je češće dolazilo do grešaka u radu. Samojetkajući sustav u jednom koraku pojednostavio je postupak, ali je adhezija na dentin bila manje učinkovita zbog upotrebe kiselih monomera odgovornih za kondicioniranje za razliku od fosforne kiseline koja se koristila u jetkajuće ispirućem sustavu. Univerzalni adhezivi ponudili su svestranost adhezije za razne direktno i indirektno postavljene restaurativne materijale poput kompozitnih ispuna, staklokeramike, cirkonija i metala te su liječniku omogućili izbor tehnike adhezije (jetkajuće ispiruća, samojetkajuća ili kombinacija odnosno tehnika selektivnog jetkanja) (61,64). Razvojem samoadhezivnih kompozitnih cemenata dodatno se pojednostavio postupak cementiranja s obzirom na to da ne zahtijevaju predobradu korijenskog dentina te pokazuju superiornu retenciju kolčića na dentin (90, 91).

Pojedinačne restauracije na prednjim zubima vrlo su izazovne za kliničara. Postendodontsku terapiju koronarne strukture gornjeg središnjeg sjekutića kod komplicirane frakture krune možemo generalno podijeliti u tri smjera (slika 22.):

1. kompozitna restauracija bez postave sustava kolčića i jezgre,
2. postava sustava kolčića i jezgre s kompozitnom restauracijom krune,
3. postava sustava kolčića i jezgre s protetskom rehabilitacijom krune.



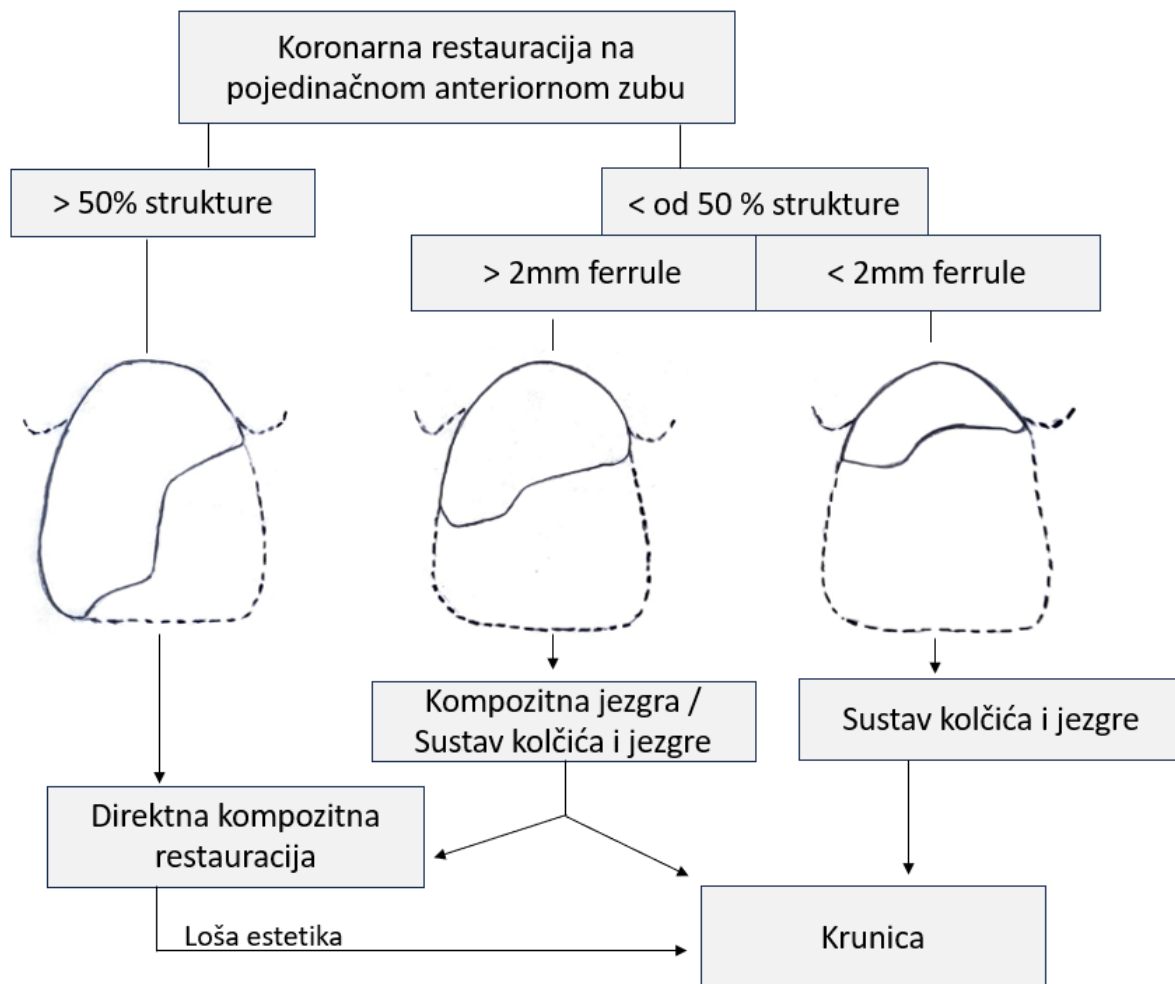
Slika 22. Postendodonska terapija na gornjem središnjem sjekutiću: 1) kompozitna restauracija bez postave kolčića; 2) postava sustava kolčića i jezgre s kompozitnom restauracijom krune; 3) postava sustava kolčića i jezgre s protetskom rehabilitacijom krune.

Tehnike restauracije bez upotrebe sustava kolčića i jezgre sve su popularnije zbog minimalne invazivnosti i pojednostavljenja u kliničkim koracima. Količina preostale koronarne strukture i debljine korijenskog dentina ključni je čimbenik koji određuje vrstu definitivnog ispuna (slika 23.) (39). Zubi s najmanje dva milimetra preostale vertikalne strukture krune zuba (*ferrule*) mogu biti restaurirani bez postave kolčića umjesto kojeg se postavlja nadogradnja od kompozitnog ispuna (82, 89). Naglasak se s vrste intrakanalne retencije prebacuje na korisnost same retencije.

U modernom kliničkom radu sve je češća direktna postava kompozitnog ispuna nakon postave kolčića kod endodontski liječenih zubi u prednjem segmentu u odnosu na tradicionalno restauriranje krunicom s obzirom na to da kod adhezivnog pristupa nema potrebe za makromehaničkom retencijom čime se čuva više zdravog zubnog tkiva i smanjuje rizik od prijeloma korijena (slika 24.) (82). Tehnika slojevanja prilikom direktne izrade koronarne restauracije kompozitnim materijalom povećava učinkovitost polimerizacije što pomaže u volumetrijskoj kompenzaciji skupljanja odnosno u smanjenju C-faktora (39). Ako je dostupan odlomljeni fragment krune tehnika adhezivnog spajanja fragmenata najbolja je opcija za pacijenta

(slika 25.). Čak i u slučaju potrebe za kombinacijom spajanja fragmenta i djelomičnog popunjavanja nepokrivenog prostora kompozitnim ispunom metoda je koja čuva izvornu prozirnost, morfološke konture i prirodne teksture površine u usporedbi s potpunom kompozitnom restauracijom ili krunicom (62).

Restaurativna terapija koronarne strukture postavom krunice u djece kontroverzna je tema (93). Za mnoge kliničare odluka je nerazumna jer zahtijeva značajnu preparaciju zuba. Prihvaćeno je mišljenje da se konačni prostorni položaj zubne okluzije postiže kada niknu drugi kutnjaci odnosno kada su u interkuspidaciji. Također, utvrđeno je da sagitalni odnos prve klase nudi bolju stabilizaciju zubnog luka. Koristeći ova načela, kada je zubna okluzija potpuna i zaključana u klasi, estetska potpuno keramička krunica u kombinaciji s kompozitnom jezgrom može biti jedan od izbora u rekonstrukciji jako oštećene koronarne strukture zuba uzrokovane traumom (94). Drugi protetski pristup u liječenju endodotski liječenih zubi bez postave kolčića uključuje korištenje pulpne komore kao produžetka same krunice, takozvanu endokrunicu. Ova se tehnika sastoji u kombiniranju nadogradnje krune i jezgre u jednom elementu te zahtijeva jednostavniju i manje invazivnu preparaciju (82). Kliničar treba uzeti u obzir sve terapijske mogućnosti i voditi se pristupom minimalno invazivne stomatologije za koji se smatra da je postao etička obaveza svakog liječnika (33).



Slika 23. Restauracija prednjeg zuba s obzirom na količinu preostale koronarne strukture (preuzeto i prilagođeno iz (92)).



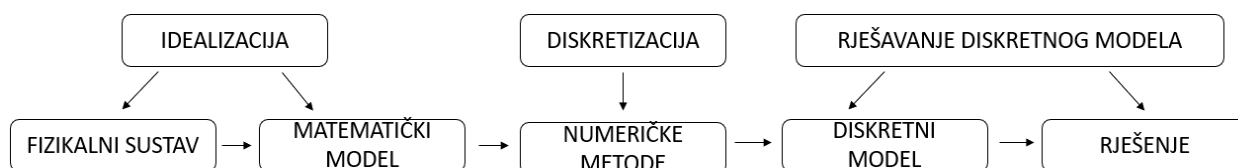
Slika 24. Postava sustava kolčića i jezgre s kompozitnom restauracijom krune nakon komplicirane frakture krune na zubu 11.



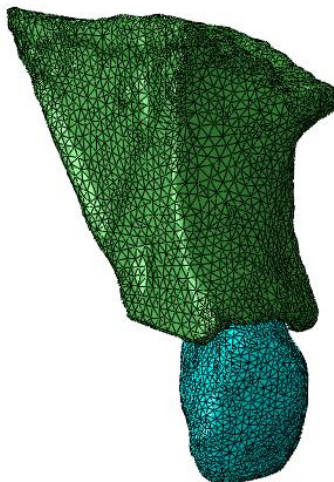
Slika 25. Adhezivno spajanje fragmenta nakon komplicirane frakture krune na zubu 21.

1.4 Metoda konačnih elemenata u stomatologiji

Gotovo svaka biološka, geološka ili mehanička pojava može se opisati uz pomoć zakona fizike (95). Metoda konačnih elemenata značajan je istraživački alat za analizu biomehanike u biološkim istraživanjima (96). Omogućava preciznu matematičku i mehaničku analizu složenih sustava sukladno onim u stomatognatom sustavu te pruža detaljnije rezultate u usporedbi s ostalim metodama koje se koriste za analizu naprezanja, poput tenzometrije i fotoelasticimetrije (97). Koristeći matematičke jednadžbe numerička analiza pretvara fizikalni problem u virtualni model predstavljen softverom konačnih elemenata (slika 26.). Model može sadržavati više dijelova modela gdje svaki dio ima svoja specifična mehanička svojstva te je diskretiziran u konačan broj elemenata kako bi se stvorila mreža konačnih elemenata (98). Konačni elementi međusobno su povezani čvorovima, a u svakom čvoru može se opisati stanje, naprezanje, deformacije, i/ili polje pomaka pomoću interpolacijskih funkcija. Prvo se izračunavaju karakteristične veličine u svakom pojedinačnom čvoru, pa time i konačnom elementu, a zatim se izračunavaju za cijelu konstrukciju. Povećanjem gustoće mreže cjelokupnog modela ili pojedinog dijela modela dobiva se veća točnost rezultata. Pouzdana aproksimacija rezultata određena je veličinom konačnih elemenata odnosno gustoćom mreže (99).



Slika 26. Numerička analiza metodom konačnih elemenata (preuzeto i prilagođeno iz (100)).

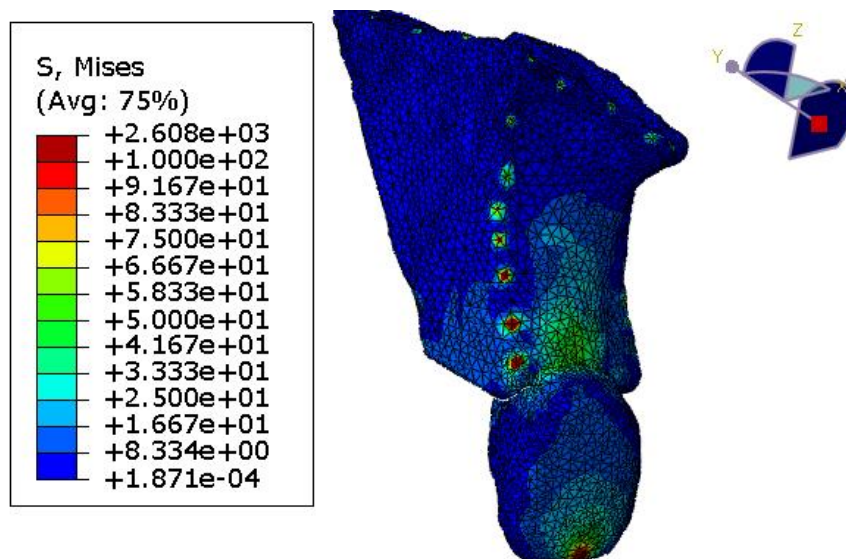


Slika 27. Virtualni model gornjeg središnjeg sjekutića i okolone kosti – mreža konačnih elemenata.

MKE uspješno raščlanjuje prijenos sile i naprezanja u biološkim sustavima poput zuba i okolnih struktura koji su složeni zbog svojih nehomogenih vanjskih i unutarnjih obilježja te nepravilnih kontura (101). Dobiveni rezultati sadrže informaciju o raspodjeli naprezanja za svaki dio analiziranog modela za razliku od vrijednosti dobivenih u *in vitro* istraživanjima kada je otežano dobivanje vrijednosti zbog kompleksnosti samog modela. Metoda predstavlja simulirano mehaničko ponašanje zuba pod okluzijskim opterećenjem te time omogućava prevladati etička i metodološka ograničenja koja postoje prilikom eksperimentalnih metoda na stvarnim uzorcima. Također, skraćuje vrijeme potrebno za provođenje istraživanja i smanjuje troškove te se zato vrlo često koristi za složena istraživanja u stomatologiji (102).

Neophodan je korak za implementaciju izrada trodimenzionalnog modela koji se diskretizira metodom konačnih elemenata (9). 3D geometrija zuba može se rekonstruirati na dva načina. Starija tradicionalna metoda sastojala se od ugrađivanja zuba u crveni epoksid i njegova rezanja okomito na uzdužnu os preciznom pilom. Svaki se presjek digitalno fotografirao nakon čega se koristeći specijalizirani računalni program izgradila 3D geometrija zuba. Dobiveni 3D model zatim se prenosio u program za analizu konačnih elemenata, gdje se bi se generirala 3D mreža, a nakon toga i analiza raspodjele naprezanja. Druga, novija metoda rekonstrukcije 3D modela zuba izvodi se uz pomoć CT-a, odnosno CBCT-a čime se olakšava i ubrzava stvaranje preciznijeg, personaliziranog modela. Ovom metodom mogu se uključiti i okolne meke strukture, skenirati i rekonstruirati veća područja koja mogu utjecati na samu analizu, dok same strukture

ostaju u ustima pacijenta te je time pacijent minimalno izložen postupku istraživanja (103). Nakon izrade modela koji je diskretiziran konačnim elementima slijedi definiranje svojstava materijala proučavane konstrukcije. Glavna su mehanička svojstva materijala koja se koriste prilikom analize Youngov modul elastičnosti (E) i Poissonov koeficijent (ν) čije se vrijednosti uglavnom mogu pronaći u literaturi (98) s napomenom kako postoji širok raspon vrijednosti korištenih u MKE istraživanjima te njihovo korištenje za specifične strukture zahtijeva sustavni pregled literature. Zatim se rubnim uvjetima definira opterećenje i ograničenje pomaka. Svaki slobodni čvor u 3D modelu ima šest stupnjeva slobode gibanja (tri translacije i tri rotacije). Rubni uvjeti opterećenja definiraju mogućnost ili nemogućnost pomaka u pojedinim smjerovima globalnog i/ili lokalnog koordinatnog sustava simulirajući stvarno stanje pomaka modela. Rubni uvjeti mogu se postaviti na čvorove ili na druga područja modela ovisno o stvarnom problemu (95). Zatim se u programskom paketu provodi analiza konačnih elemenata i na kraju MKE softver predstavlja rezultate numeričke analize koji su traženi na samom početku analize (stanje naprezanje, tlak, deformacija, pomak, itd.) (slika 28.) (103).



Slika 28. Raspodjela naprezanja na MKE modelu gornjeg središnjeg sjekutića.

Metoda konačnih elemenata koristi se u mnogim granama dentalne medicine. U implantologiji za proučavanje biomehaničkih svojstava implantata, periimplantne kosti i njihove interakcije za dugoročnu stabilnost i uspješnost implantata (104). U ortodonciji za procjenu mehanike pomicanja zuba odnosno evaluaciju područja raspodjele napreznja u parodontalnom ligamentu i alveolarnoj kosti tijekom pomaka zuba te za identificiranje potencijalnih područja resorpcije korijena (105). U endodonciji za vizualizaciju napreznja unutar rotirajućih NiTi instrumenata tijekom oblikovanja korijenskog kanala i pružanje uvida u njihovo mehaničko ponašanje (106). Nedostatak metode konačnih elemenata ograničenost je u procjeni širenja pukotine koja posljedično dovodi do loma (odvajanja) rotacijskih instrumenata budući da problem uključuje razvoj diskontinuiteta koji se mora regenerirati u svakom koraku. U restaurativnoj dentalnoj medicini i protetici MKE se koristi za razumijevanje biomehanike zuba te za evaluaciju obrazaca nastanka i raspodjele napreznja između zuba i materijala korištenih u obnavljanju prirodne strukture zuba ili zuba koji nedostaje, za procjenu trajnosti različitih materijala pod okluzalnim silama i utjecaja njihove vanjske konfiguracije, za razumijevanje biomimetičkog pristupa te za procjenu najpovoljnijeg ishoda odnosno postupka s najmanjom vjerojatnošću neuspjeha (107, 108). U području traumatološke kirurgije MKE omogućuje precizno mapiranje raspodjele napreznja i identifikaciju područja posebno sklonih prijelomima (109).

Zaključno, kada se struktura podvrgne opterećenju, unutar strukture inducira se napreznje koje može dovesti do njegove deformacije. Pomoću metode konačnih elemenata izazvano napreznje može se precizno analizirati procjenom područja koncentracije napreznja (72). Za potvrdu kliničke učinkovitosti i predviđanja dugoročnog uspjeha restaurativnih sustava od najveće je važnosti pravilno razumijevanje fizikalnih veličina koje utječu na mehaničko ponašanje biomaterijala. Metoda konačnih elemenata omogućava detaljnu evaluaciju mehaničkog ponašanja bioloških i restaurativnih sustava i može biti korisna u optimizaciji kriterija restaurativnog dizajna i izbora materijala te u predviđanju potencijalnog neuspjeha (69).

2. SVRHA ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE

Svrha ovog istraživanja bila je ispitati biomehanički odgovor mladog trajnog avitalnog gornjeg središnjeg sjekutića s obzirom na razvojni stadij korijena nakon postendodontske terapije kompliciranog prijeloma krune koja uključuje intrakanalnu retenciju.

Ciljevi:

Procijeniti raspodjelu naprezanja unutar korijenskog dentina te odrediti područje u kojem je naprezanje najveće.

Usporediti biomehanički odgovor korijena zuba na fleksibilnu i rigidnu intrakanalnu retenciju.

Usporediti biomehanički odgovor korijena zuba između više različitih fleksibilnih intrakanalnih retencija.

Usporediti rezultate s intaktnim mladim trajnim zubom završenog rasta i razvoja korijena.

Hipoteze istraživanja:

1. Najveće naprezanje javlja se u cervikalnom dijelu korijena endodontski liječenog zuba s intrakanalnom retencijom.
2. Intrakanalna retencija i njezina stabilnost ovisne su o debljini preostalog korijenskog dentina.

3. MATERIJALI I METODE

Za istraživanje je bio potreban jedan CBCT prednjeg maksilarnog segmenta te 137 intraoralnih periapikalnih rendgenskih slika gornjega središnjega sjekutića u djece dobi od sedam do 11 godina. Za analizu opterećenja korištena je metoda konačnih elemenata. Sve numeričke analize provedene su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Za korištenje rendgenskih snimaka roditelji/skrbnici djeteta potpisali su opći informirani pristanak koji se uzima prije svakog dentalnog zahvata na Zavodu za dječju i preventivnu stomatologiju KBC-a Zagreb, a unutar kojeg je uključen i pristanak za korištenje rendgenskih snimaka u istraživačke svrhe. Informirani pristanak za korištenje CBCT snimke, a koji su, u skladu s etičkim normama i u suradnji s Etičkim povjerenstvom Stomatološkog Fakulteta u Zagrebu, potpisali roditelji/skrbnici na Zavodu za ortodonciju KBC-a Zagreb. Informativni pristanak sadržavao je sve važne informacije o istraživanju; cilj, postupak te vrijednosti rezultata.

3.1 Izrada personaliziranog 3D modela

Jedan CBCT poslužio je za izradu 3D personaliziranog modela zuba metodom konačnih elemenata, a sadržavao je intaktni gornji trajni središnji sjekutić sa završenim razvojem korijena u djeteta školske dobi. Iz CBCT snimke izolirao se odgovarajući gornji središnji sjekutić (njegova geometrija) te u programskom paketu Mimics (verzija 16.0, Materialise, Leuven, Belgija) izradio 3D model zuba nakon čega je mreža konačnih elemenata dobivena u MKE programskom paketu Abaqus (USA). Svakom dijelu modela bila je pridodana zasebna mreža konačnih elemenata, i to tetraedarski konačni elementi drugog reda koji se sastoje od deset čvorova. Time se dobio personalizirani 3D model zuba.

Na dobivenom osnovnom personaliziranom modelu uspješno je provedena linearna i nelinearna analiza te je potvrđen protokol rada za ostale modele:

- izrada 3D modela
- geometrija modela
- utvrđivanje karakteristika bioloških tkiva (kosti i zuba)
- kontaktne površine

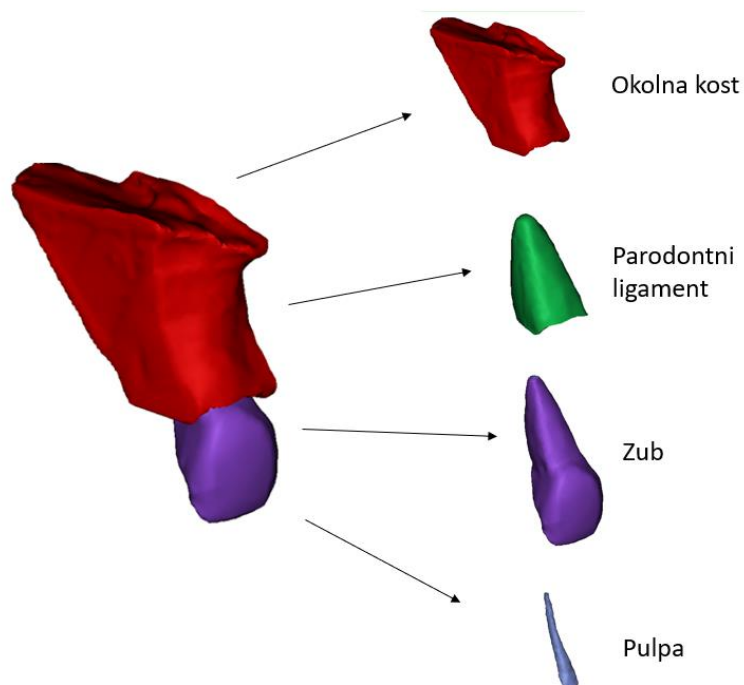
- rubni uvjeti
- rubni uvjeti opterećenja
- analiza
- ocjena rezultata metode konačnih elemenata

IZRADA 3D MODELA

3D model dobiven je iz CBCT slike stvarnog pacijenta; stoga je 3D model personalizirani model. CT skeniranje napravljeno je pomoću CBCT skenera u rezoluciji od 200 mikrona izotropno. CT slike sastojale su se od 375 poprečnih presjeka koji pokrivaju sloj debljine od 0.200 mm i širinu piksela od 0.200 mm, što je bilo dovoljno za rekonstrukciju zuba, kosti i PDL-a. Postupak globalne razine HU korišten je za segmentiranje gornjeg sjekutića i okolne kosti. Za trabekularnu kost postavljeni su donji i gornji prag od 226 i 661 Hounsfield Unit (HU), za kortikalnu kost pragovi su bili 662 i 1988, za zub 1989 i 3071 HU, a za meko tkivo -70 i 225 HU. Parodontalni prostor (koji je obično < 1,5 mm) definiran je kao prostor između zuba i kosti vidljiv na CBCT snimci. Model je izrađen u programu Mimics (verzija 17.0, Materialize). Da bi se postiglo savršeno poklapanje zuba, PDL-a i kosti, provedene su Booleove operacije.

GEOMETRIJA MODELA

Svaki je dio modela zaseban sa svojom geometrijom, pa su stoga svi dijelovi povezani 10-čvornim tetraedarskim elementima. Svaka je komponenta homogena s različitim svojstvima materijala (slika 29.). Komponente modela povezane su pomoću opcije kontakta (engl. *tie contact*), gdje je pulpa povezana sa zubom, zub s unutarnjom stranom PDL-a, a kost s vanjskom stranom PDL-a.



Slika 29. Izdvojene komponente MKE modela.

UTVRĐIVANJE KARAKTERISTIKA BIOLOŠKIH TKIVA, KOSTI I ZUBA

Materijalna svojstva zuba, kosti, PDL-a i pulpe preuzeta su iz literature (110, 111). Sve su komponente modela modelirane kao linearno elastične i izotropne. Vrijednosti mehaničkih svojstava prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Mehanička svojstva osnovnog modela.

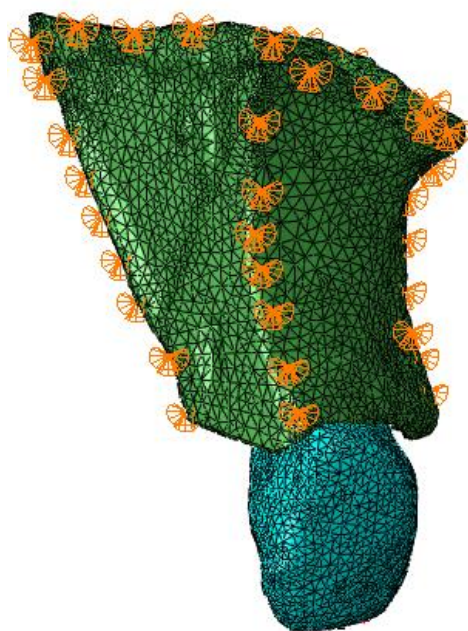
| Bioške strukture | E, MPa | ν, - | Literatura |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| Caklina | 41000 | 0.3 | (110) |
| Dentin | 18600 | 0.31 | (110) |
| PDL | 0.67 | 0.45 | (111) |
| Pulpa | 2.07 | 0.45 | (110) |
| Kortikalna kost | 13400 | 0.26 | (110) |
| Trabekularna kost | 345 | 0.36 | (110) |

KONTAKTNE POVRŠINE

Dijelovi modela koji su u međusobnom kontaktu su povezani rubnim uvjetom kontakta gdje je korišten rubni uvjet (engl. *Tie*, veza). Prije definiranja rubnog uvjeta kontakta bilo je bitno da dijelovi modela koji su međusobno u kontaktu savršeno naliježu jedan na drugi tako da nema prodiranja jednog dijela modela u drugi. Prilikom modeliranja geometrije korištene su Boolean operacije da bi se postiglo savršeno nalijezanje. Potom su dijelovi modela međusobno povezani *Tie* vezom koja omogućava povezivanje dvije površine za vrijeme trajanja simulacije krutom vezom, odnosno čvorovi slave površine su povezani s čvorovima *master* površine na način da svaki čvor ima istu vrijednost pomaka, pa time i deformacija i naprezanja.

RUBNI UVJETI

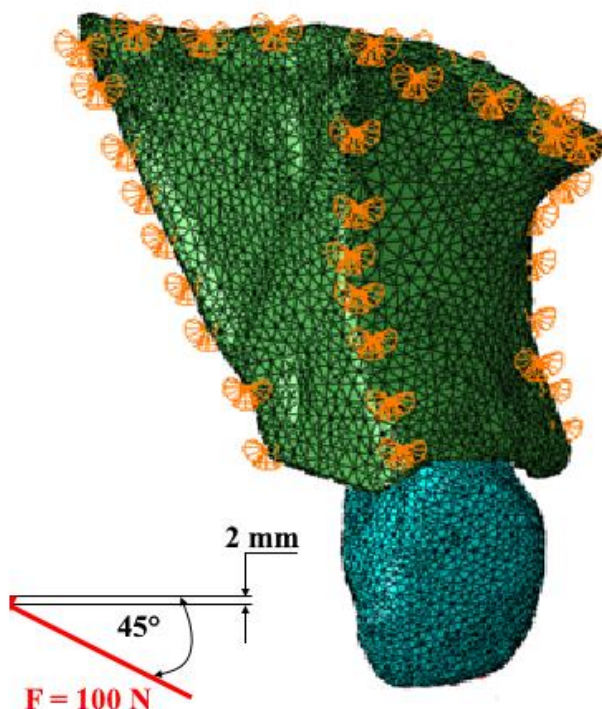
Na mezijalnoj i distalnoj strani, kao i na gornjem rubu lingvalne i labijalne strane kosti, svi su pomaci bili onemogućeni, u smjeru sve tri osi Kartezijevog koordinatnog sustava, što je predstavljalo stvarno stanje veze s ostatkom donje čeljusti (slika 30.).



Slika 30. Rubni uvjeti.

RUBNI UVJETI OPTEREĆENJA

Opterećenje je bilo sila iznosa 100N postavljeno na palatinalnu površinu zuba (2 mm od incizalnog ruba) pod kutom od 45° (slika 31.).



Slika 31. Uvjeti opterećenja.

ANALIZA

Sve analize provedene su prvo geometrijski nelinearnom analizom, a u sljedećem koraku provedena je i dinamička analiza u programskom paketu za analizu konačnim elementima Abaqus.

OCJENA REZULTATA METODE KONAČNIH ELEMENATA

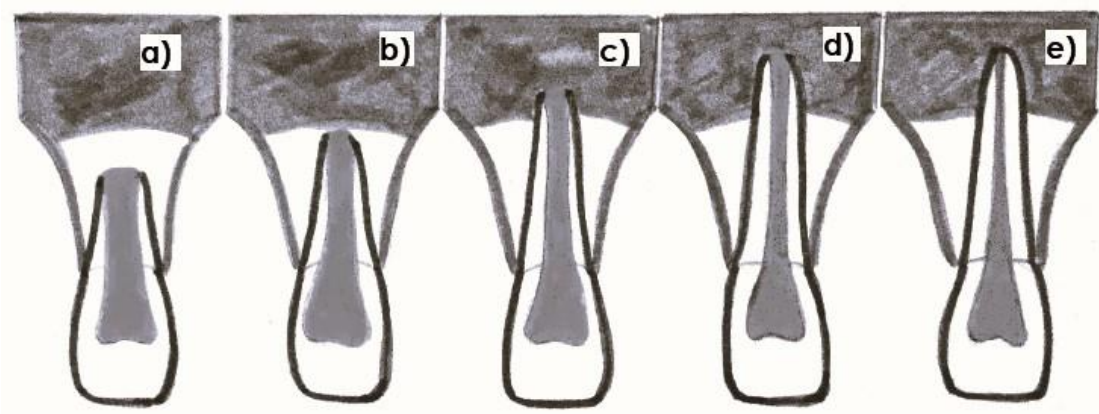
Rezultati numeričke analize potvrdit će se rezultatima dostupnim iz literature.

3.2 Izrada modela stadija rasta i razvoja korijena

Za rekonstrukciju ostalih modela rasta i razvoja korijena korištene su vrijednosti prosječne debljine dentinskog zida izmjerene na intraoralnim rendgenskim snimkama djece dobi od sedam do 11 godina (tablica 2.). Pregledano je 137 rendgenskih snimki koje su zatim bile kategorizirane prema razvojnim stadijima korijena: razvoj jedne polovine korijena (stadij S1), tri četvrtine (stadij S2), više od tri četvrtine (stadij S3), potpuno razvijeni korijen s otvorenim apeksom (stadij S4) te potpuno razvijeni korijen sa zatvorenim apeksom (stadij S5) (slike 32. i 33.).

Tablica 2. Srednje vrijednosti širine korijenskog dentina ili pulpe za pet skupina razvojnih stadija kod gornjega središnjeg sjekutića.

| Širina korijena/pulpe [mm] | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| K1 | 1,84 | 2,03 | 2,14 | 2,08 | 2,20 |
| K2 | 3,08 | 2,68 | 2,47 | 2,45 | 2,25 |
| K3 | 1,82 | 1,94 | 2,01 | 2,08 | 2,08 |
| K | 6,74 | 6,65 | 6,63 | 6,61 | 6,53 |
| L1 | 1,00 | 1,07 | 1,21 | 1,26 | 1,46 |
| L2 | 3,66 | 2,65 | 1,87 | 1,27 | 0,84 |
| L3 | 0,95 | 1,00 | 1,04 | 1,13 | 1,34 |
| L | 5,61 | 4,73 | 4,13 | 3,67 | 3,65 |
| M1 | 0,42 | 0,58 | 0,58 | 0,54 | 0,73 |
| M2 | 4,07 | 2,67 | 1,58 | 0,76 | 0,43 |
| M3 | 0,34 | 0,50 | 0,48 | 0,50 | 0,66 |
| M | 4,82 | 3,76 | 2,64 | 1,81 | 1,83 |
| N | 4,24 | 2,87 | 1,49 | 0,68 | 0,40 |



Slika 32. Stadiji razvoja korijena (shema):

- a) stadij u kojem je razvijena jedna polovina korijena zuba,
- b) stadij u kojem su razvijene tri četvrtine korijena zuba,
- c) stadij u kojem je razvijeno više od tri četvrtine korijena zuba,
- d) stadij u kojem je potpuno razvijen korijen s otvorenim apeksom,
- e) stadij u kojem je potpuno razvijen korijen sa zatvorenim apeksom.



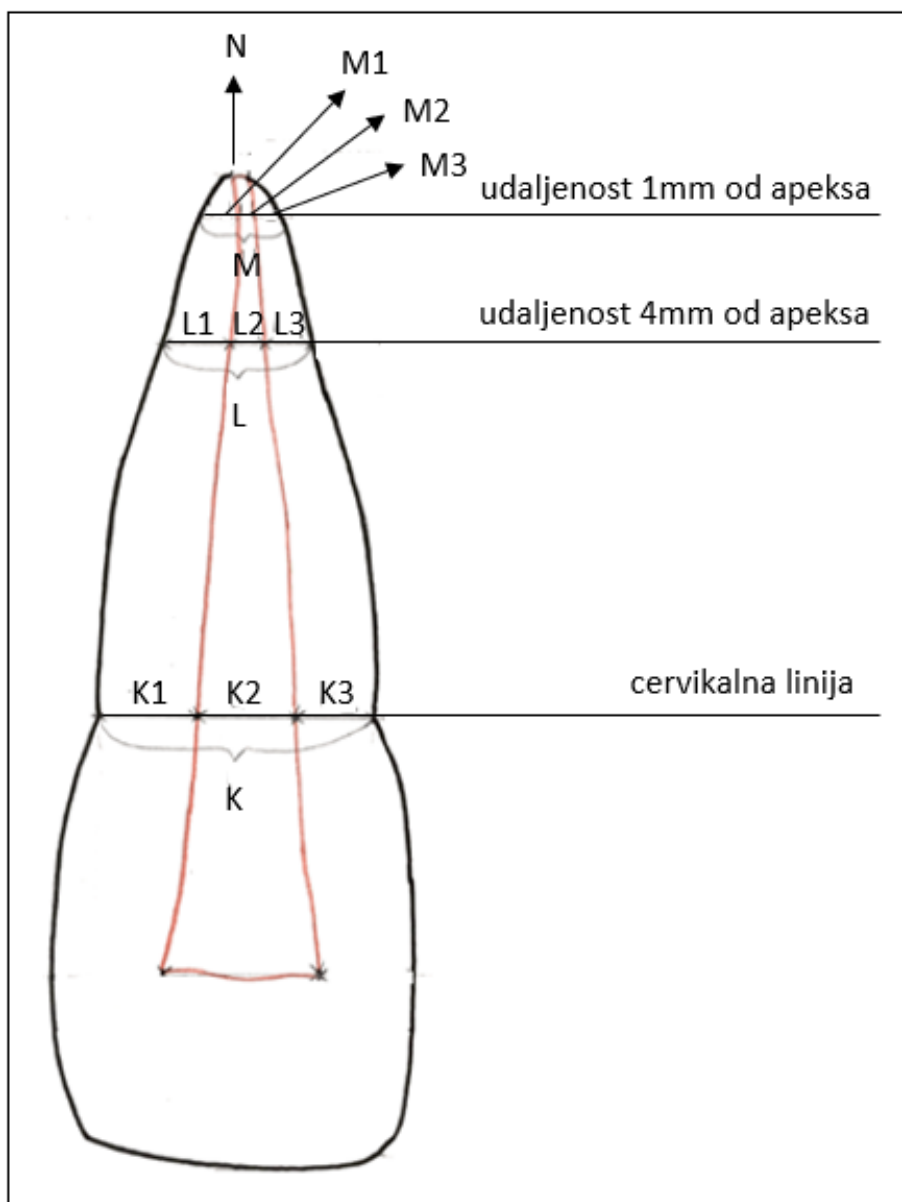
Slika 33. Stadiji razvoja korijena prema RTG-u:

- a) stadij u kojem je razvijena jedna polovina zuba,
- b) stadij u kojem su razvijene tri četvrtine korijena zuba,
- c) stadij u kojem je razvijeno više od tri četvrtine korijena zuba,
- d) stadij u kojem je potpuno razvijen korijen s otvorenim apeksom,
- e) stadij u kojem je potpuno razvijen korijen sa zatvorenim apeksom.

Širina korijenskog dentina i pulpe izmjerena je na tri referentne linije: razini cervikalne linije (K), na razini četiri milimetra od apeksa (L) te na razini jednog milimetra od apeksa (M) (slika 34.). Izmjerena je širina korijenskog dentina distalno od pulpe (K1, L1 i M1), širina pulpe (K2, L2 i M2), širina korijenskog dentina mezijalno od pulpe, (K3, L3 i M3) i širina apikalnog otvora (N) u dijagnostičkom softveru Soredex Scanora 5.1.2.4 (slika 35.).

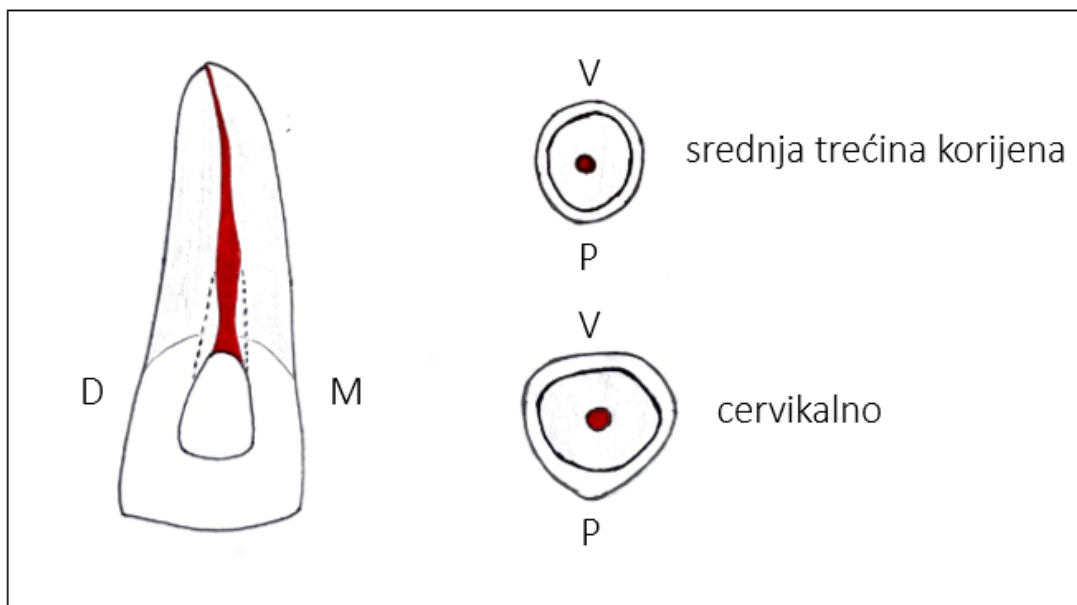


Slika 34. Referentne (horizontalne) linije na intraoralnoj rendgenskoj snimci; na razini cervikalne linije (K), na udaljenosti četiri milimetra od apeksa (L), na udaljenosti od jednog milimetra od apeksa (M).



Slika 35. Debljina dentinskog zida na tri referentne razine: na razini cervikalne linije (K), na razini četiri milimetra od apeksa (L), na razini jednog milimetra od apeksa (M).

Dvodimenzionalni podaci s intraoralnih snimki koristili su se za oblikovanje (modeliranje) trodimenzionalnog modela u skladu s anatomijom korijena gornjeg središnjeg sjekutića (18) odnosno u skladu s gotovo jednakom udaljenošću pulpnog kanala od vanjskih rubova korijena (slika 36.).



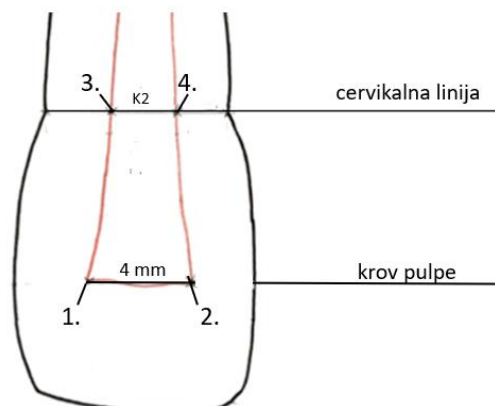
Slika 36. Anatomija korijena i pulpnog kanala gornjeg središnjega sjekutića; D = distalno, M = mezijalno, V = vestibularno, P = palatinalno.

Iz literature (112) su preuzete prosječne vrijednosti duljine za GSS sa završenim razvojem korijena: 23,5 mm za ukupnu duljinu zuba, 13,0 mm za duljinu korijena te 10,5 mm za duljinu krune. Prema tome su izračunate vrijednosti duljine korijena za ostale stadije: 6,5 mm za stadij S1; 9,7 mm za stadij S2; 9,7 mm – 13,0 mm za stadij S3 odnosno raspon između stadija S2 i S4; te 13,0 mm za stadije S4 i S5. Apikalni otvor > 0,45 mm smatrao se otvorenim. U tablici 3. prikazan je predložen omjer duljine krune i korijena.

Tablica 3. Omjer duljine krune i korijena prema srednjim vrijednostima duljine za gornji središnji sjekutić s obzirom na razvojni stadij korijena.

| Stadij | Srednja vrijednost duljine krune (mm) | Srednja vrijednost duljine korijena (mm) | Omjer krune i korijena |
|--------|---------------------------------------|--|------------------------|
| S1 | 10.5 | 6.5 | 1:0,61 |
| S2 | | 9.7 | 1:0,92 |
| S3 | | 10.0-12.5 | 1:0,95 – 1:1,19 |
| S4 | | 13.0 | 1:1,23 |
| S5 | | 13.0 | 1:1,23 |

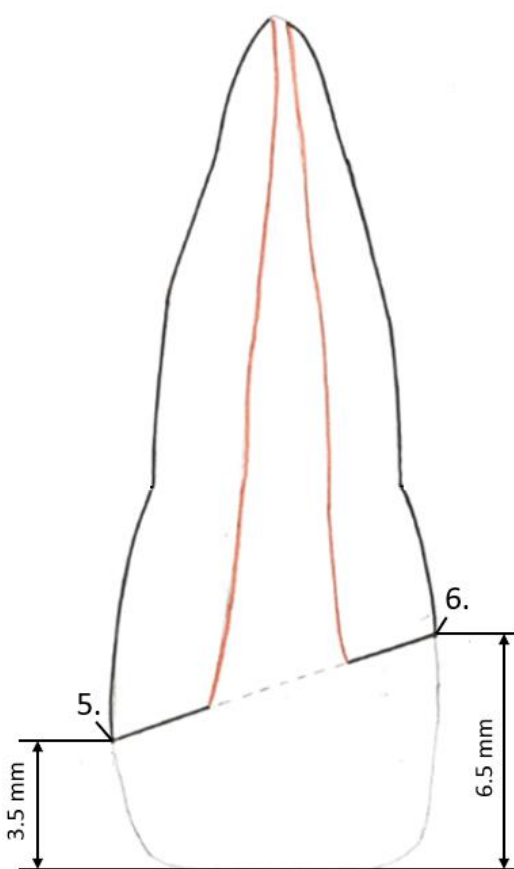
Vrijednosti širine i duljine pulpne komorice unutar krune preuzete su s CBCT snimke gornjega središnjega sjekutića. Iz frontalne perspektive dvodimenzionalne intraoralne snimke postavljene su 4 točke: točka 1 i točka 2 koje predstavljaju robove pulpe unutar krune zuba te točka 3 i točka 4 koje predstavljaju rubove pulpe na cervikalnoj liniji. Spajanjem točaka 1 i 2 dobivena je vrijednost širine krova pulpne komorice koja je na svim ostalim modelima rasta i razvoja bila nepromjenjiva (4 mm). Spajanjem točaka 3 i 4 dobivena je vrijednost širine pulpe na cervikalnoj liniji (širina K2) odnosno promjenjiva veličina koja se povećavala sukladno stadijima rasta i razvoja korijena prethodno izmjenjenim na intraoralnim snimkama gornjeg središnjeg sjekutića (slika 37.). Spajanjem točaka 1 i 3 te točaka 2 i 4 na svakom modelu rasta i razvoja korijena dobiven je prostor pulpe unutar krune zuba.



Slika 37. Shema pulpnog prostora unutar krune zuba. Točke 1 i 2 predstavljaju robove pulpe unutar krune zuba, točke 3 i 4 predstavljaju rubove pulpe na cervikalnoj liniji.

3.3 Simulacija prijeloma krune

Nakon izrade pet modela intaktnoga gornjega središnjega sjekutića prema stadijima razvoja korijena, simuliran je prijelom krune zuba; komplicirani kosi prijelom krune zuba s gubitkom polovine krune. Točka 5 predstavlja prijelomni rub cakline distalno (udaljenost 3,5 mm od incizalnog brida) a točka 6 prijelomni rub cakline mezijalno (udaljenost 6,5 mm od incizalnog brida). Spajanjem točaka 5 i 6 simuliran je prijelom krune. Skica prijeloma prikazana je na slici 38.



Slika 38. Skica prijeloma krune; točka 5 predstavlja prijelomni rub cakline distalno, a točka 6 prijelomni rub cakline mezijalno.

3.3 Simulacija terapijskog postupka

Cijeli terapijski postupak uključivao je završeno endodontsko liječenje s intrakanalnom retencijom i minimalno invazivnom (adhezivnom) restauracijom krune zuba. Unutar modela rasta i razvoja korijena nakon simulacije prijeloma krune prenesene su geometrijske karakteristike (specifikacije) materijala koji su se koristiti u terapiji, njihove granice unutar zuba te njihova mehanička svojstva; modul elastičnosti i Poissonov omjer (tablica 4.).

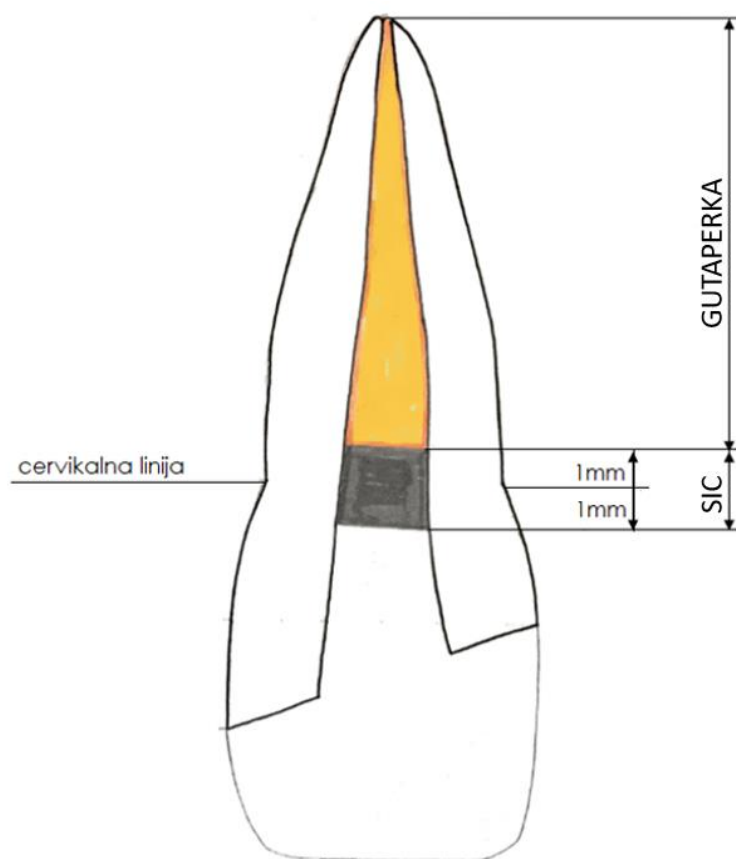
Tablica 4. Mehanička svojstva materijala korištenih u istraživanju; modul elastičnosti i Poissonov omjer.

| Materijali | E , MPa | ν , - | Literatura |
|--|-----------|-----------|------------|
| Gutaperka | 0,14 | 0,45 | (113) |
| Staklenoionomerni cement | 8,0 | 0,25 | (114) |
| Kompozitni ispun | 13,45 | 0,17 | (115) |
| Kolčić ojačan staklenim vlaknima RelyX post 3M ESPE | 37,5 | 0,26 | (116,117) |
| Kolčić ojačan staklenim vlaknima GC Fiberpost GC | 40,0 | 0,25 | (118) |
| Individualni kolčić ojačan staklenim vlaknima EverStick Post GC | 15,0 | 0,18 | (118) |
| Metalni kolčić Metal post Unimetric 1.0 Dentsply | 110 | 0,32 | (119) |
| Kompozitni cement | 8,3 | 0,28 | (119) |

Dubina preparacije za intrakanalni kolčić ovisila je o stadiju razvoja korijena s primarno ostvarenim uvjetom ostavljanja 4 mm gutaperke u apikalnom dijelu korijena. Modeli su bili podijeljeni u eksperimentalne skupine s obzirom na vrstu intrakanalne retencije: RelyX Post 3M ESPE Deutschland GmbH, Seefeld, Njemačka (RXP), GC fiber post GC, Tokio, Japan (GCP), metal post Unimetric 1.0 Dentsply, Ballaigues, Švicarska (UMP), everStick Post GC, Tokio, Japan (ESP) te pozitivna kontrolna skupina bez retencije (GPK). Model intaktnog zuba (OMZ) poslužio je kao negativna kontrolna skupina. Ukupno 30 modela.

1.3.1 Endodontsko liječenje

Simulacija endodontskog liječenja sastojala se od punjenja korijenskog kanala gutaperkom do jednog milimetra ispod cervikalnog ruba, podloge od staklenoionomernog cementa debljine dva milimetra te kompozitnog ispuna u ostatku krune (slika 39.). Modifikacija postojećeg modela rasta i razvoja sastojala se u promjeni mehaničkih svojstava korijenskog kanala koji je umjesto pulpe sada sadržavao svojstva gutaperke i staklenoionomernog cementa te dijela krune zuba koji je sadržavao svojstva kompozitnog ispuna. Vrijednosti duljine gutaperke s obzirom na stadije rasta i razvoja korijena prikazane su u tablici 5. Modeli samo s punjenjem u korijenskom kanalu poslužili su kao pozitivna kontrolna skupina.



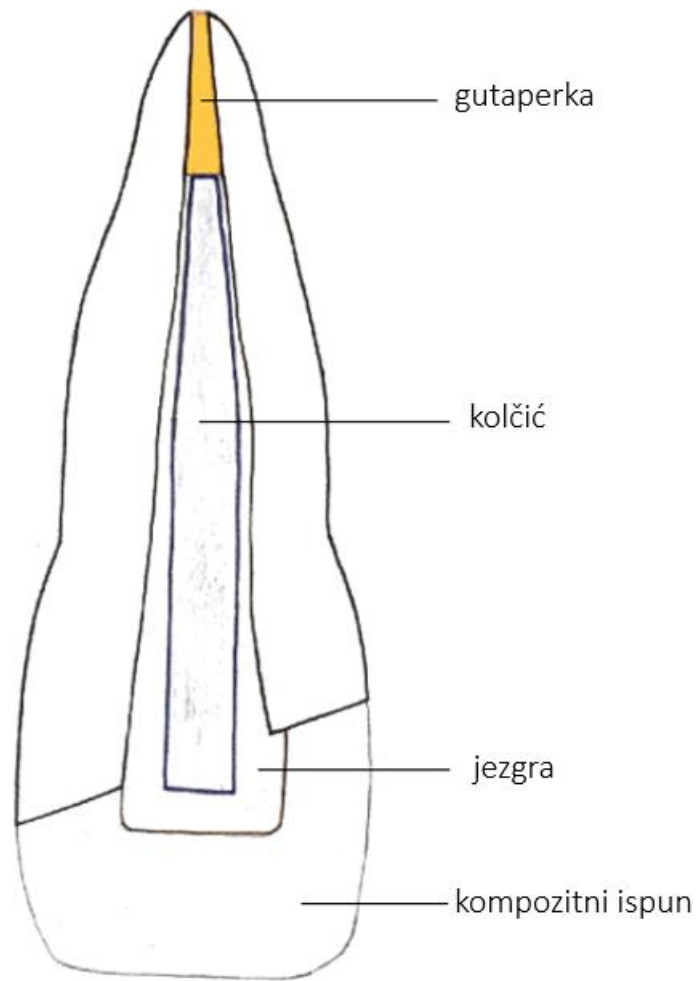
Slika 39. Simulacija endodontskog liječenja.

Tablica 5. Vrijednosti duljine gutaperke s obzirom na stadije rasta i razvoja korijena.

| STADIJ RAZVOJA | DULJINA (mm) | | | | |
|-------------------|--------------|-------|---------|-----------|-----|
| | zub | kruna | korijen | gutaperka | SIC |
| S5 | 23,5 | 10,5 | 13,0 | 12,0 | 2,0 |
| S4 | 23,5 | | 13,0 | 12,0 | |
| S3 | 22,0 | | 11,5 | 10,5 | |
| S2 | 20,2 | | 9,7 | 8,7 | |
| S1 | 17,0 | | 6,5 | 5,5 | |

1.3.2 Postendodontska opskrba zuba

Simulacija postendodontskog liječenja sastojala se od ostavljanja 4 mm gutaperke apikalno, intrakanalne retencije odnosno više različitih sustava nadogradnje i jezgre te postave kompozitnog ispuna kao završne restauracije. Modifikacija se provela na postojećim modelima rasta i razvoja korijena a sastojala se u promjeni granica određenih dijelova strukture zuba s obzirom na položaj i geometrijske karakteristike korištenih materijala te promjeni mehaničkih svojstava korijenskog kanala odnosno pulpnog prostora koji je sada umjesto pulpe sadržavao svojstva gutaperke, nadogradnje, cementa i ujedno jezgre intrakanalne retencije te dijela krune zuba koji je sada sadržavao svojstva kompozitnog ispuna (slika 40.).

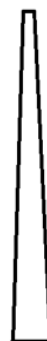


Slika 40. Postendodonska opskrba zuba.

1.3.2.1 RelyX Post

Prostor pulpe na osnovnom modelu intaktnog zuba podijeljen je na tri dijela odnosno tri materijala; gutaperku, kolčić i kompozitni cement. Od vrha apikalnog otvora do 4 mm ispod apikalnog otvora označen je prostor za gutaperku koja je u tom području u potpunosti zauzimala volumen korijenskog kanala odnosno pulpnog prostora. Na svim modelima rasta i razvoja korijena duljina gutaperke iznosila je uvijek 4 mm. RelyX post kolčić smješten je točno u sredinu korijenskog kanala na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora do krova pulpe unutar krune zuba. Geometrijske karakteristike RelyX post kolčića (120) prikazane su na slici 41. Duljina kolčića kod početnog modela odnosno S5 stadija (potpuno završeni razvoj korijena) iznosila je 15 mm i dalje se skraćivala prema stadijima razvoja korijena odnosno kako se duljina korijena smanjivala (tablica 6.). Promjer vrha kolčića bio je na svim radnim modelima nepromijenjen dok se promjer baze kolčića smanjivao kako se skraćivala duljina kolčića. Preostali prostor oko kolčića i unutar korijenskog kanala označen je za kompozitni cement. Sav preostali prostor u kruni zuba nakon prijeloma označen je za kompozitni ispun (slika 42.).

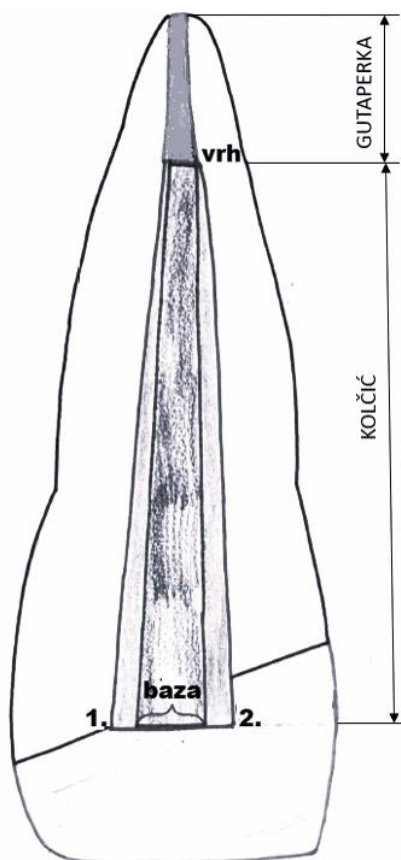
Duljina kolčića: 20mm
Vrh promjer: 0,9mm
Baza promjer: 1,9mm
Sužavanje: 5,72%
Koničnost: 10%



Slika 41. Geometrijske karakteristike RelyX posta.

Tablica 6. Dimenzije RelyX post kolčića prema stadijima rasta i razvoja korijena

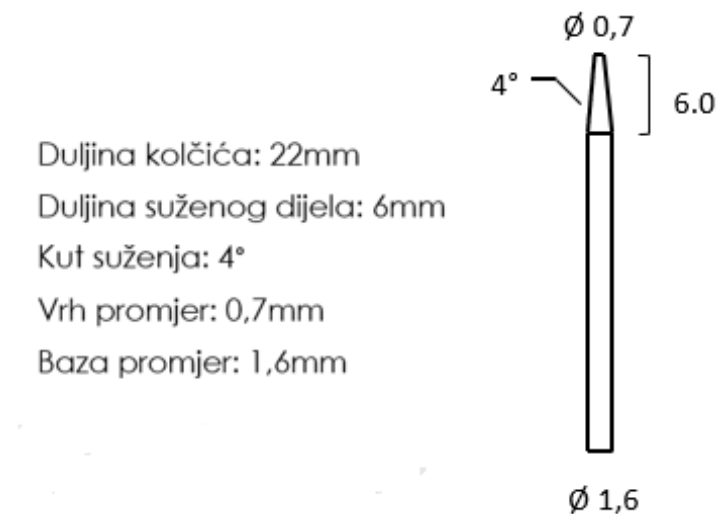
| STADIJ RAZVOJA | DULJINA KOLČIĆA (mm) | ŠIRINA KOLČIĆA (mm) | |
|-------------------|----------------------------|------------------------|------|
| | | vrh | baza |
| S5 | 15,0 | 0,9 | 1,75 |
| S4 | 15,0 | | 1,75 |
| S3 | 13,5 | | 1,65 |
| S2 | 11,7 | | 1,5 |
| S1 | 8,5 | | 1,2 |



Slika 42. Skica postendodonske opskrbe zuba – RXP model.

1.3.2.2 GC fiber post

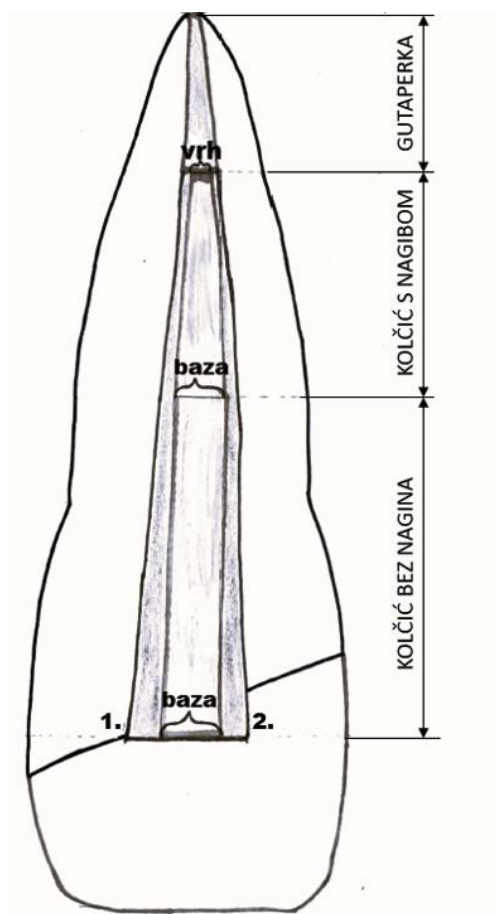
Prostor pulpe na osnovnom modelu intaktnog zuba podijeljen je na tri dijela odnosno tri materijala; gutaperku, kolčić i kompozitni cement. Od vrha apikalnog otvora do 4 mm ispod apikalnog otvora označen je prostor za gutaperku koja je u tom području u potpunosti zauzimala volumen korijenskog kanala odnosno pulpnog prostora. Na svim modelima rasta i razvoja korijena duljina gutaperke iznosila je uvijek 4 mm. GC fiberpost kolčić smješten je točno u sredinu korijenskog kanala na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora do krova pulpe unutar krune zuba. Geometrijske karakteristike kolčića (121) prikazane su na slici 43. Kolčić se sastoji od dva dijela. Prvi dio duljine 6 mm s nagibom od 4 stupnja, vrhom promjera 0,7 mm i bazom promjera 1,6 mm. Drugi dio bez nagiba s vrhom i bazom promjera 1,6 mm. Prvi dio bio je nepromijenjen u svojoj duljini na svim modelima dok se drugi dio skraćivao prema stadijima razvoja korijena odnosno kako se smanjivala duljina korijena (tablica 7.). Preostali prostor oko kolčića i unutar korijenskog kanala označen je za kompozitni cement. Sav preostali prostor u kruni zuba nakon prijeloma označen je za kompozitni ispun (slika 44.).



Slika 43. Geometrijske karakteristike GC fiber post kolčića.

Tablica 7. Dimenzije GC fiberposta prema stadijima razvoja korijena

| STADIJ RAZVOJA | DULJINA KOLČIČA (mm) | | | ŠIRINA KOLIČA (mm) | |
|-------------------|-------------------------|------------|-----------|--------------------|------|
| | kolčić | bez nagiba | s nagibom | vrh | baza |
| S5 | 15,0 | 6,0 | 9,0 | 0,7 | 1,6 |
| S4 | 15,0 | | 9,0 | | |
| S3 | 13,5 | | 7,5 | | |
| S2 | 11,7 | | 5,7 | | |
| S1 | 8,5 | | 2,5 | | |



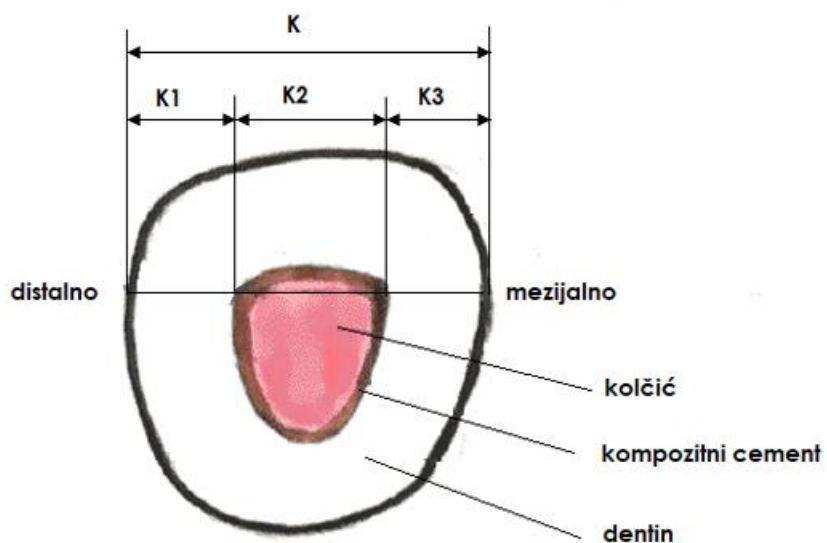
Slika 44. Skica postendodontske opskrbe zuba - GFP model.

1.3.2.3 EverStick Post

Prostor pulpe na osnovnom modelu intaktnog zuba podijeljen je na tri dijela odnosno tri materijala; gutaperku, kolčić i kompozitni cement. Od vrha apikalnog otvora do 4 mm ispod apikalnog otvora označen je prostor za gutaperku koja je u tom području u potpunosti zauzimala volumen korijenskog kanala odnosno pulpnog prostora. Na svim sljedećim modelima rasta i razvoja korijena duljina gutaperke iznosila je uvijek 4 mm. EverStick post kolčić smješten je točno u sredinu korijenskog kanala na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora do krova pulpe unutar krune zuba. Duljina kolčića kod osnovnog modela iznosila je 15 mm i dalje se skraćivala prema stadijima razvoja korijena odnosno kako se duljina korijena smanjivala (tablica 8.). EverStick post je individualni kolčić koji gotovo u potpunosti zauzima volumen pulpnog prostora izuzev 0,1 mm prostora oko cijelog individualnog kolčića ostavljenog za kompozitni cement (slika 45). Kod stadija S4 i S5 modela širina kolčića na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora bila je jednaka širini kolčića u cervikalnom dijelu (vrijednost K2) s obzirom na to da u kliničkom radu ne bi bilo moguće izvaditi nadogradnju prije unošenja kompozitnog cementa i polimerizacije zbog suženja u cervikalnom dijelu odnosno veće širine pulpnog prostora u apikalnom dijelu. Sav preostali prostor u kruni zuba nakon prijeloma označen je za kompozitni ispun (slika 46.).

Tablica 8. Dimenzije EverStick Post kolčića prema stadijima rasta i razvoja korijena.

| STADIJ RAZVOJA | DULJINA KOLČIĆA (mm) | ŠIRINA KOLČIĆA (mm) | | |
|-------------------|----------------------------|------------------------|-----|------------|
| | | kolčić | vrh | cervikalno |
| S5 | 15,0 | 0,7 | 2,1 | 3,8 |
| S4 | 15,0 | 1,0 | 2,2 | |
| S3 | 13,5 | 1,7 | 2,3 | |
| S2 | 11,7 | 2,4 | 2,4 | |
| S1 | 8,5 | 2,8 | 2,8 | |



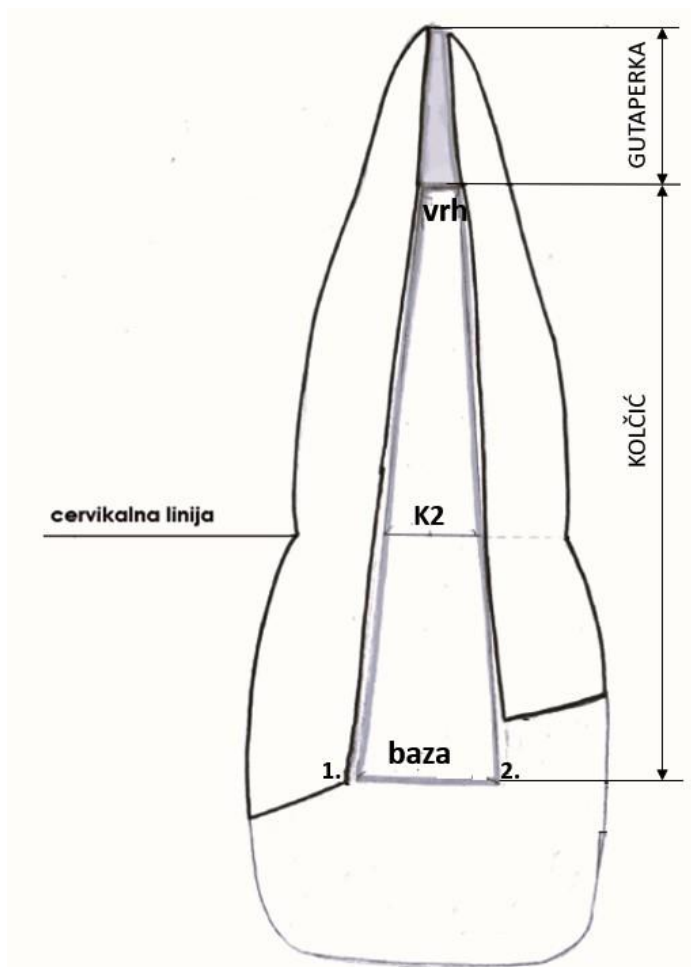
Slika 45. Skica tlocrta EverStick post kolčića na razini cervikalne linije;

K = širina zuba na cervikalnoj liniji,

K1 = širina dentina distalno na cervikalnoj liniji,

K2 = širina pulpnog prostora na cervikalnoj liniji,

K3 = širina dentina mezijalno na cervikalnoj liniji.



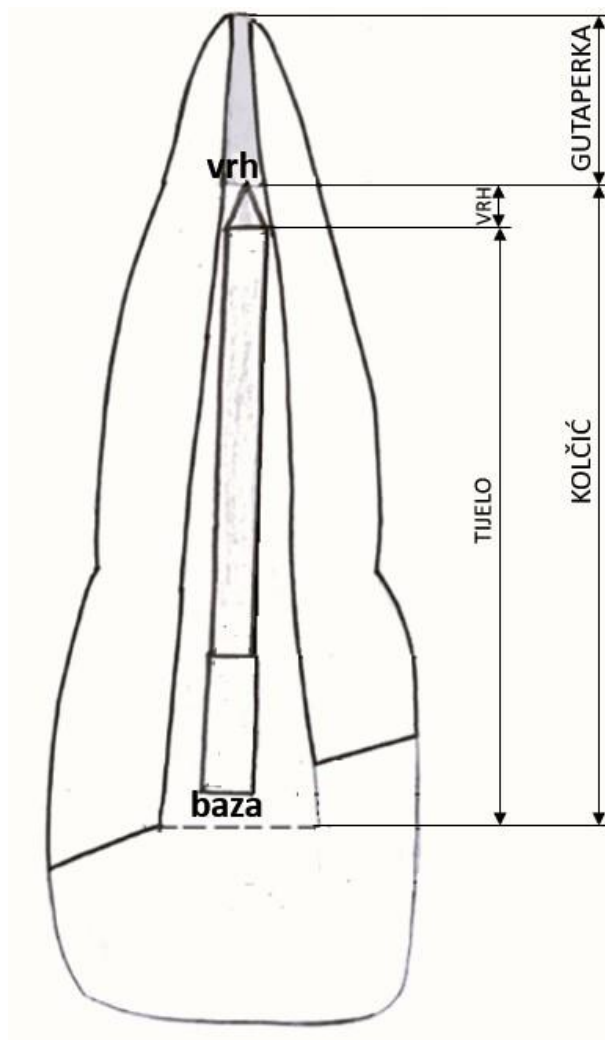
Slika 46. Skica postendodontske opskrbe zuba – ESP model; K2 = širina pulpnog prostora na cervikalnoj liniji.

3.3.2.4 Metal post Unimetric

Prostor pulpe na osnovnom modelu intaktnog zuba podijeljen je na tri dijela odnosno tri materijala; gutaperku, kolčić i kompozitni cement. Od vrha apikalnog otvora do 4 mm ispod apikalnog otvora označen je prostor za gutaperku koja je u tom području u potpunosti zauzimala volumen korijenskog kanala odnosno pulpnog prostora. Na svim sljedećim modelima rasta i razvoja korijena duljina gutaperke iznosila je uvijek 4 mm. Metal Post Unimetric je konfekcijski kolčić koji dolazi u različitim veličinama (122) te je za svaki stadij odabrana ona duljina kolčića koja je najbolje odgovarala s obzirom na duljinu korijena (tablica 9). Kolčić je postavljen točno u sredinu korijenskog kanala na udaljenosti 4 mm od apikalnog otvora do određene duljine unutar krune zuba s obzirom na odabranu veličinu. Preostali prostor oko kolčića i unutar korijenskog kanala označen je za kompozitni cement. Sav preostali prostor u kruni zuba nakon prijeloma označen je za kompozitni ispun.

Tablica 9. Dimenzije Metal Unimetric post 1.0 kolčića prema stadijima rasta i razvoja korijena

| STADIJ RAZVOJA | DULJINA KOLČIĆA (mm) | | | ŠIRINA KOLČIĆA (mm) | |
|-------------------|-------------------------|--------|-----|------------------------|-----|
| | kolčić | tijelo | vrh | baza | vrh |
| S5 | 15,0 | 14,0 | 1,0 | 1,0 | 0,1 |
| S4 | 15,0 | 14,0 | | | |
| S3 | 13,5 | 12,5 | | | |
| S2 | 11,7 | 10,7 | | | |
| S1 | 8,5 | 7,5 | | | |



Slika 47. Skica postendodontske opskrbe – UMP model.

3.5 Uvjeti opterećenja

Primijenjeno je statičko opterećenje iznosa 100 N na palatinalnu plohu zuba (2 mm od incizalnog brida) pod kutom od 45 stupnjeva te su očitana naprezanja po teoriji Henckey Von Mises.

3.6 Statistička analiza

S obzirom na to da podaci unutar pojedinih skupina od $n=80$ nisu statistički značajno odstupali od normalne distribucije (ispitano pomoću Shapiro-Wilk testa i normalnih Q-Q dijagrama), analiza je provedena analizom varijance (ANOVA) u tri smjera, s čimbenicima „materijal“, „stadij razvoja“ i „razina korijena (apikalno/cervikalno)“. Interakcije čimbenika bile su visoko statistički značajne ($p<0.001$) i stoga su učinci svakog od čimbenika ispitani pri zadanim razinama preostalih dvaju čimbenika pomoću jednosmjerne ANOVA-e uz Tukey prilagodbu za višestruke usporedbe. Odstupajuće vrijednosti (*outlieri*) uključene su u sve analize s obzirom na balansirani dizajn i razmjerno nisku frekvenciju pojavljivanja odstupajućih vrijednosti u odnosu na sveukupnu veličinu uzorka. U svim analizama, p-vrijednosti niže od 0,05 smatrale su se statistički značajnim. Statistička analiza izrađena je pomoću softverskog paketa SPSS, verzija 25.0 (IBM, Armonk, NY, SAD).

2. REZULTATI

Numeričke vrijednosti ekvivalentnih naprezanja po HMH teoriji unutar korijenskog dentina podijeljene u pet stadija razvoja korijena na dvije razine kod svih materijala prikazane su na slikama 48-50.

Naprezanje se unutar korijenskog dentina generalno smanjivalo od S1 prema S5 stadiju kod većine modela na obje razine osim većeg odstupanja kod GFP i OMZ modela kod kojih je S2 stadij imao statistički značajno manje naprezanje od S3 stadija na apikalnoj razini, zatim kod UMP modela kod kojeg je S1 stadij imao značajno manje naprezanje od S2 stadija na apikalnoj razini te kod ESP modela kod kojeg je S1 stadij imao značajno manje naprezanje od S2 stadija i svih ostalih stadija na cervikalnoj razini (tablica 10.) (slike 48.-50.).

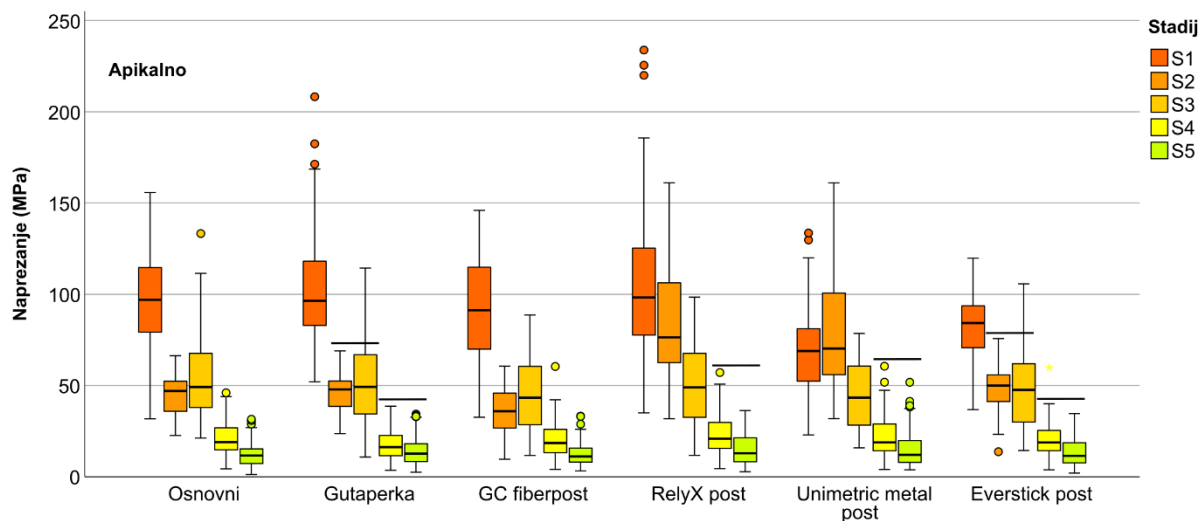
Srednje vrijednosti HMH naprezanja unutar pojedinog stadija razvoja korijena bile su statistički značajno veće na cervikalnoj razini kod svih ispitivanih modela u S3, S4 i S5 stadiju, te kod ESP, GFP, GPK i OMZ modela u S2 stadiju. RXP i UMP model u S2 stadiju te svi modeli u S1 stadiju imali su srednje vrijednosti naprezanja značajno veće na apikalnoj razini (tablica 10.).

Najmanje vrijednosti HMH naprezanja na cervikalnoj razini imali su ESP model u S1 (55.19+/-1.70), S2 (58.78+/-0.93) i S3 stadiju (58.84+/-1.04) te GFP model u S4 (58.74+/-1.11) i S5 stadiju (58.87+/-1.02). Najmanje vrijednosti HMH naprezanja na apikalnoj razini imali su UMP model u S1 stadiju (69.60+/-5.03), GFP model u S2 (35.99+/-2.63), S3 (44.30+/-4.07) i S5 stadiju (12.51+/-1.42) te GPK model u S4 stadiju (17.85+/-1.88). Najveće vrijednosti HMH naprezanja na cervikalnoj razini imao je OMZ model u svim stadijima (S1 64.88+/-1.33, S2 63.12+/-1.06, S3 61.42+/-1.13, S4 62.07+/-1.13, S5 60.68+/-1.10). Najveće vrijednosti HMH naprezanja na apikalnoj razini imao je RXP model u svim stadijima (S1 105.59+/-8.72, S2 85.50+/-6.84, S4 23.29+/-2.47, S5 15.19+/-1.95) osim u S3 stadiju u kojem je OMZ model imao najveće vrijednosti (54.28+/-5.20) (tablica 10).

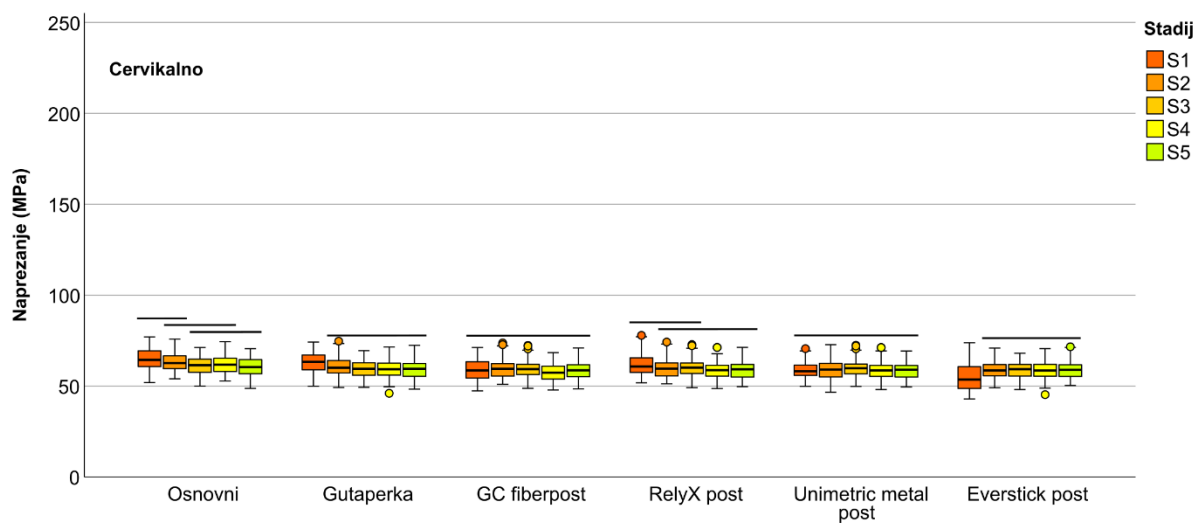
U usporedbama između modela od različitih materijala opaženo je puno preklapanja u statistički homogenim skupinama (slike 51.-55.). U S5 stadiju svi modeli su imali statistički slične vrijednosti i na cervikalnoj i na apikalnoj razini. U S4 stadiju na cervikalnoj razini OMZ model se značajno razlikovao od ostalih modela koji su bili statistički slični, a na apikalnoj razini GPK model se značajno razlikovao od RXP modela dok su s njima bili statistički slični ostali modeli. U S3 stadiju na cervikalnoj razini OMZ model se značajno razlikovao od ESP modela

dok su s njima bili statistički slični ostali modeli. U S3 stadiju na apikalnoj razini OMZ model se statistički značajno razlikovao od GFP i UMP modela dok su ostali modeli bili statistički slični. U S2 stadiju na cervikalnoj razini OMZ model se značajno razlikovao od ostalih modela koji su bili statistički slični. U S2 stadiju na apikalnoj razini RXP i UMP model su bili statistički slični, GPK i ESP model su bili statistički slični te je OMZ model bio statistički sličan s GFP, GPK i ESP modelom. U S1 stadiju na cervikalnoj razini OMZ, UMP i ESP model su se statistički značajno razlikovali dok je GPK model bio statistički sličan s OMZ i RXP modelom, a GFP model je bio statistički sličan s RXP i UMP modelom. U S1 stadiju na apikalnoj razini RXP, UMP i ESP model su se statistički značajno razlikovali dok su se OMZ i GPK bili statistički slični s RXP i GFP modelom a GFP dodatno s ESP modelom. Treća razina usporedbi (između apikalnog i cervikalnog dijela) nije označavana na slikama s obzirom na to da je bila statistički značajna u svim slučajevima. U tablicama 11 i 12 prikazane su p-vrijednosti kod usporedbe različitih vrsta materijala između razvojnih faza, a u tablicama 13 i 14 prikazane su p-vrijednosti kod usporedbe razvojnih stadija između različitih vrsta materijala.

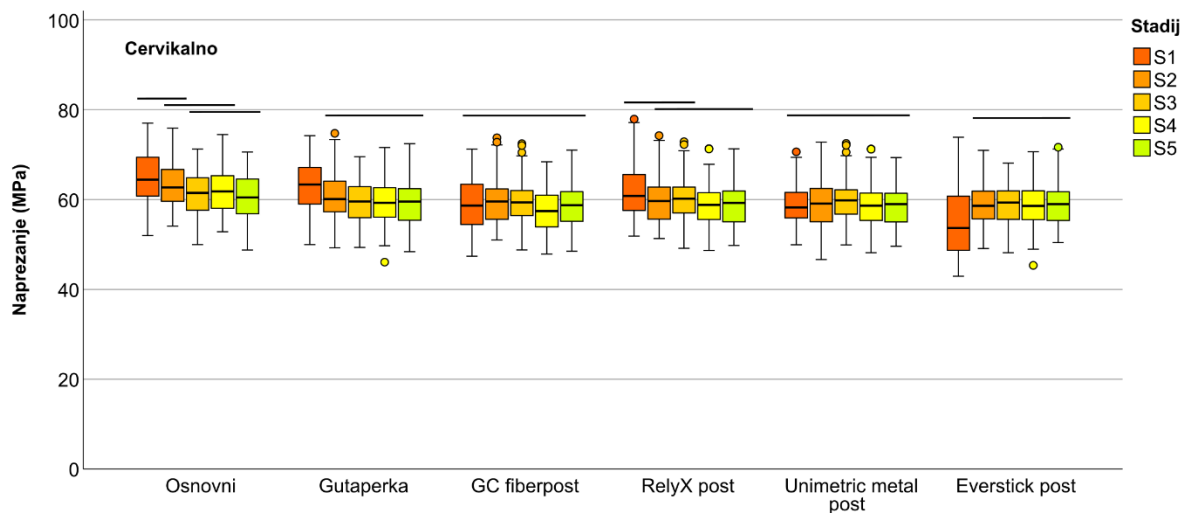
Na slikama 56-61 prikazan je sagitalni presjek a na slikama 62-67 frontalni presjek svakog MKE modela u odnosu na razvojne stadije korijena.



Slika 48. Raspodjela HMH naprezanja između modela podijeljena u pet stadija razvoja korijena na apikalnoj razini.



Slika 49. Raspodjela HMH naprezanja između modela podijeljena u pet stadija razvoja korijena na cervikalnoj razini.

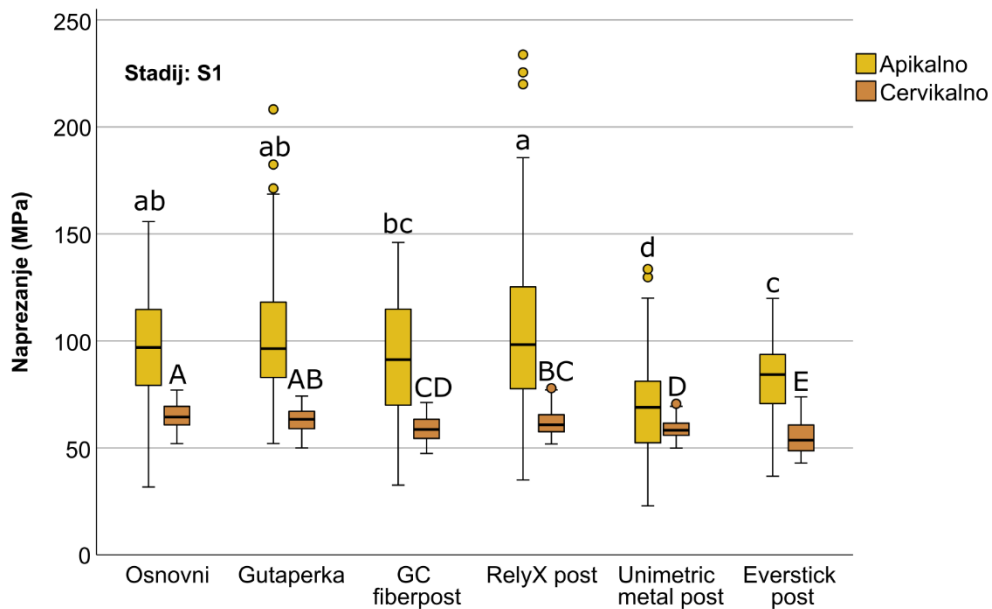


Slika 50. Raspodjela HMH naprezanja s manjim rasponom na Y-osi (0-100 MPa) između modela podijeljena u pet stadija razvoja korijena na cervikalnoj razini.

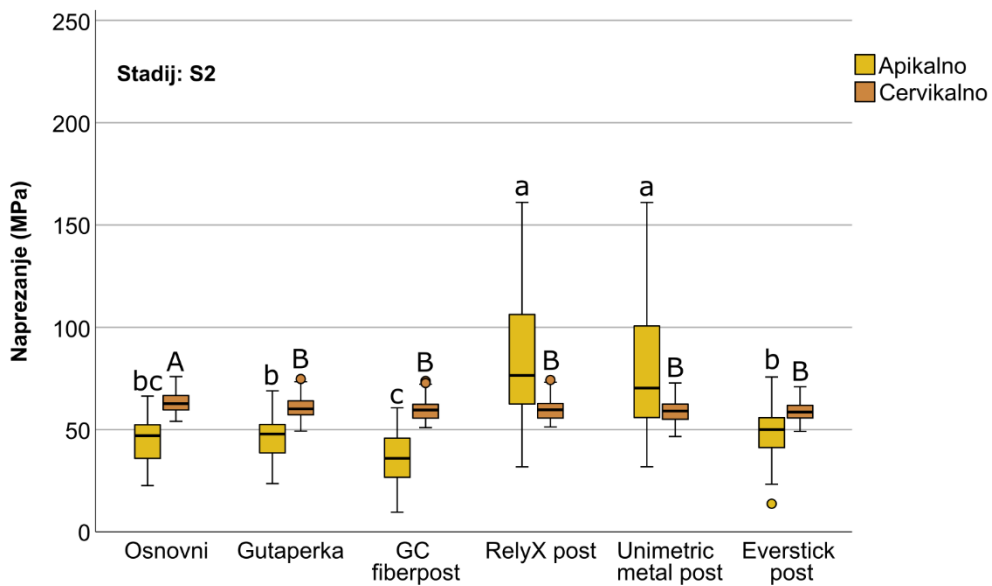
Tablica 10. Srednja vrijednost HMH naprežanja i standardna devijacija unutar pojedinog stadija razvoja korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.

| APIKALNA RAZINA | | | | | | |
|--------------------------|------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Model | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| ESP | s.v. | 82,832793+/- 3,954523 | 48,437790+/- 2,735859 | 47,957237+/- 4,715939 | 20,240601+/- 2,144627 | 14,082532+/- 1,81894 |
| | s.d. | 17,7700137 | 12,2938381 | 21,1915095 | 9,6370828 | 8,1735741 |
| GFP | s.v. | 91,782934+/- 6,177627 | 35,995320+/- 2,631654 | 44,302061+/- 4,079252 | 20,127785+/- 2,146402 | 12,512315+/- 1,429503 |
| | s.d. | 27,7597388 | 11,8255786 | 18,3304960 | 9,6450544 | 6,4236036 |
| GPK | s.v. | 103,446323+/- 6,687331 | 46,105060+/- 2,325562 | 52,494238+/- 4,898534 | 17,855811+/- 1,88326 | 14,405484+/- 1,844179 |
| | s.d. | 30,0501391 | 10,4501287 | 22,0120182 | 8,4625986 | 8,2869899 |
| OMZ | s.v. | 97,951628+/- 5,95552 | 44,968470+/- 2,39821 | 54,288548+/- 5,200646 | 21,256683+/- 1,964331 | 12,673912+/- 1,635806 |
| | s.d. | 26,7616816 | 10,7765776 | 23,3695807 | 8,8269045 | 7,3506448 |
| RXP | s.v. | 105,598909+/- 8,723321 | 85,503531+/- 6,841442 | 51,113214+/- 4,555693 | 23,299608+/- 2,479081 | 15,196414+/- 1,954312 |
| | s.d. | 39,1990509 | 30,7426477 | 20,4714252 | 11,1399804 | 8,7818819 |
| UMP | s.v. | 69,601913+/- 5,032565 | 80,840202+/- 6,870363 | 44,537915+/- 4,088197 | 21,738523+/- 2,538855 | 15,177136+/- 2,337894 |
| | s.d. | 22,6142988 | 30,8726113 | 18,3706897 | 11,4085755 | 10,5055451 |
| CERVICALNA RAZINA | | | | | | |
| Model | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| ESP | s.v. | 55,198636+/- 1,707512 | 58,783645+/- 0,934638 | 58,840109+/- 1,042886 | 58,741290+/- 1,1198 | 58,877875+/- 1,020235 |
| | s.d. | 7,6728621 | 4,1998797 | 4,6863032 | 5,0319273 | 4,5845208 |
| GFP | s.v. | 59,069612+/- 1,285418 | 59,706542+/- 1,115507 | 59,357904+/- 0,79571 | 57,485307+/- 1,035033 | 58,815875+/- 1,086349 |
| | s.d. | 5,7761454 | 5,0126347 | 4,9775942 | 4,6510129 | 4,8816081 |
| GPK | s.v. | 63,006565+/- 1,243105 | 60,519415+/- 1,207089 | 59,642281+/- 1,080087 | 59,440372+/- 1,14023 | 59,509362+/- 1,145238 |
| | s.d. | 5,5860066 | 5,4241626 | 4,8534714 | 5,1237308 | 5,1462299 |
| OMZ | s.v. | 64,887659+/- 1,339067 | 63,127116+/- 1,063324 | 61,427767+/- 1,139909 | 62,075846+/- 1,137915 | 60,687287+/- 1,104523 |
| | s.d. | 6,0172194 | 4,7781441 | 5,1222847 | 5,1133251 | 4,9632734 |
| RXP | s.v. | 61,605217+/- 1,254833 | 60,128498+/- 1,149565 | 59,898739+/- 1,145792 | 58,790446+/- 1,02362 | 58,982097+/- 1,094309 |
| | s.d. | 5,6387082 | 5,1656775 | 5,1487222 | 4,5997291 | 4,9173760 |
| UMP | s.v. | 58,771664+/- 0,966017 | 59,297463+/- 1,138448 | 59,640320+/- 1,117942 | 58,621001+/- 1,08416 | 58,664777+/- 0,985198 |
| | s.d. | 4,3408872 | 5,1157206 | 5,0235774 | 4,8717714 | 4,4270766 |

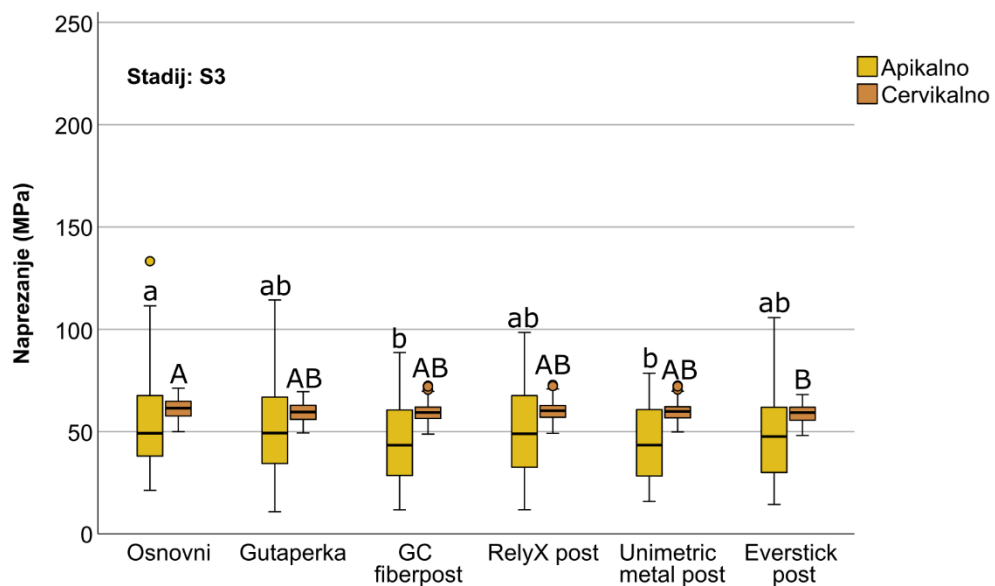
*s.v.=srednja vrijednost, s.d.=standardna devijacija



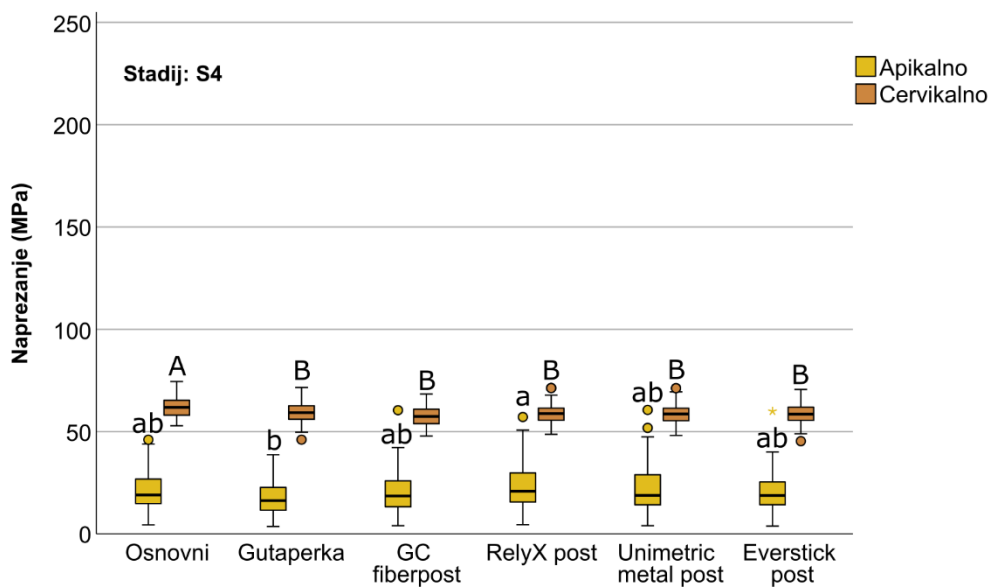
Slika 51. Raspodjela HMH naprezanja između modela u S1 razvojnom stadiju korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.



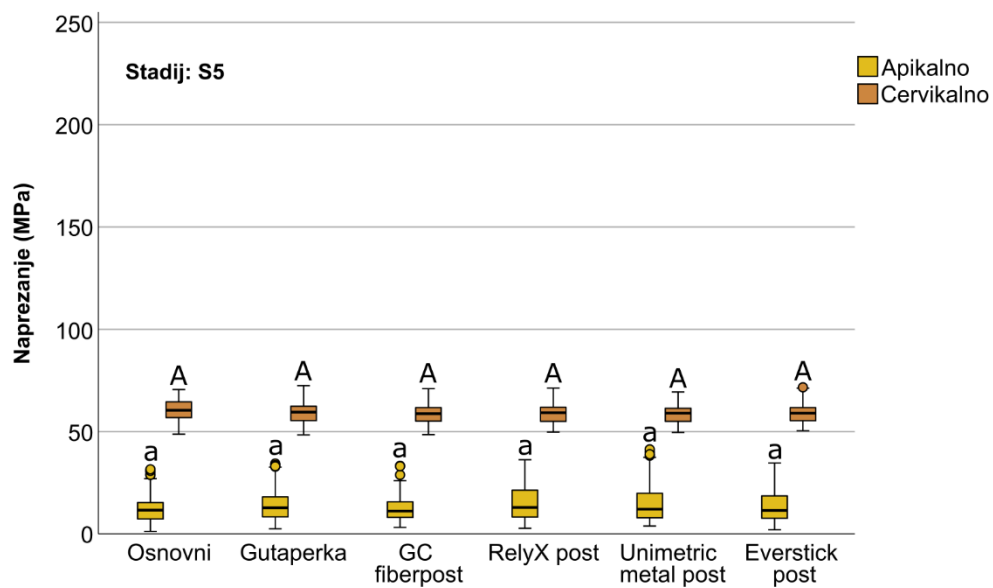
Slika 52. Raspodjela HMH naprezanja između modela u S2 razvojnom stadiju korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.



Slika 53. Raspodjela HMH naprezanja između modela u S3 razvojnom stadiju korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.



Slika 54. Raspodjela HMH naprezanja između modela u S4 razvojnom stadiju korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.



Slika 55. Raspodjela HMH naprezanja između modela u S4 razvojnom stadiju korijena na apikalnoj i cervikalnoj razini.

Tablica 11. Rezultati univarijatne ANOVA-e kod usporedbe različitih vrsta materijala između razvojnih faza na apikalnoj razini (Tukey HSD).

p- vrijednost

| MATERIJAL | | APIKALNA RAZINA | | | | |
|----------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Everstick post | GC fiber post | 0,337 | 0,001 | 0,874 | 1,000 | 0,842 |
| | Gutaperka | 0,000 | 0,977 | 0,736 | 0,651 | 1,000 |
| | Osnovni | 0,010 | 0,884 | 0,383 | 0,987 | 0,894 |
| | RelyX post | 0,000 | 0,000 | 0,929 | 0,372 | 0,959 |
| | Unimetric post | 0,036 | 0,000 | 0,903 | 0,931 | 0,962 |
| GC fiber post | Everstick post | 0,337 | 0,001 | 0,874 | 1,000 | 0,842 |
| | Gutaperka | 0,094 | 0,019 | 0,125 | 0,697 | 0,706 |
| | Osnovni | 0,735 | 0,055 | 0,029 | 0,979 | 1,000 |
| | RelyX post | 0,025 | 0,000 | 0,299 | 0,330 | 0,325 |
| | Unimetric post | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,909 | 0,333 |
| Gutaperka | Everstick post | 0,000 | 0,977 | 0,736 | 0,651 | 1,000 |
| | GC fiber post | 0,094 | 0,019 | 0,125 | 0,697 | 0,706 |
| | Osnovni | 0,820 | 0,999 | 0,994 | 0,254 | 0,779 |
| | RelyX post | 0,997 | 0,000 | 0,998 | 0,007 | 0,991 |
| | Unimetric post | 0,000 | 0,000 | 0,148 | 0,133 | 0,992 |
| Osnovni | Everstick post | 0,010 | 0,884 | 0,383 | 0,987 | 0,894 |
| | GC fiber post | 0,735 | 0,055 | 0,029 | 0,979 | 1,000 |
| | Gutaperka | 0,820 | 0,999 | 0,994 | 0,254 | 0,779 |
| | RelyX post | 0,520 | 0,000 | 0,927 | 0,783 | 0,397 |
| | Unimetric | 0,000 | 0,000 | 0,036 | 1,000 | 0,406 |
| RelyX post | Everstick post | 0,000 | 0,000 | 0,929 | 0,372 | 0,959 |
| | GC fiber post | 0,025 | 0,000 | 0,299 | 0,330 | 0,325 |
| | Gutaperka | 0,997 | 0,000 | 0,998 | 0,007 | 0,991 |
| | Osnovni | 0,520 | 0,000 | 0,927 | 0,783 | 0,397 |
| | Unimetric post | 0,000 | 0,683 | 0,339 | 0,919 | 1,000 |
| Unimetric post | Everstick post | 0,036 | 0,000 | 0,903 | 0,931 | 0,962 |
| | GC fiber post | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,909 | 0,333 |
| | Gutaperka | 0,000 | 0,000 | 0,148 | 0,133 | 0,992 |
| | Osnovni | 0,000 | 0,000 | 0,036 | 1,000 | 0,406 |
| | RelyX post | 0,000 | 0,683 | 0,339 | 0,919 | 1,000 |

Tablica 12. Rezultati univarijatne ANOVA-e kod usporedbe različitih vrsta materijala između razvojnih faza na cervikalnoj razini (Tukey HSD).

p- vrijednost

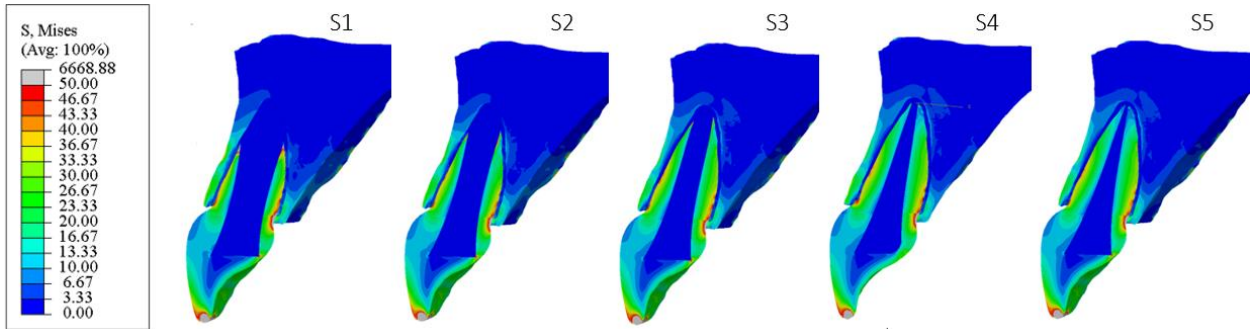
| MATERIJAL | | CERVIKALNA RAZINA | | | | |
|----------------|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| Everstick post | GC fiber post | 0,001 | 0,848 | 0,986 | 0,586 | 1,000 |
| | Gutaperka | 0,000 | 0,234 | 0,911 | 0,946 | 0,962 |
| | Osnovni | 0,000 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 0,169 |
| | RelyX post | 0,000 | 0,524 | 0,759 | 1,000 | 1,000 |
| | Unimetric post | 0,002 | 0,987 | 0,912 | 1,000 | 1,000 |
| GC fiber post | Everstick post | 0,001 | 0,848 | 0,986 | 0,586 | 1,000 |
| | Gutaperka | 0,000 | 0,906 | 0,999 | 0,120 | 0,944 |
| | Osnovni | 0,000 | 0,000 | 0,091 | 0,000 | 0,141 |
| | RelyX post | 0,075 | 0,995 | 0,983 | 0,543 | 1,000 |
| | Unimetric post | 1,000 | 0,995 | 0,999 | 0,687 | 1,000 |
| Gutaperka | Everstick post | 0,000 | 0,234 | 0,911 | 0,946 | 0,962 |
| | GC fiber post | 0,000 | 0,906 | 0,999 | 0,120 | 0,944 |
| | Osnovni | 0,338 | 0,012 | 0,208 | 0,009 | 0,636 |
| | RelyX post | 0,666 | 0,996 | 1,000 | 0,960 | 0,983 |
| | Unimetric post | 0,000 | 0,628 | 1,000 | 0,898 | 0,879 |
| Osnovni | Everstick post | 0,000 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 0,169 |
| | GC fiber post | 0,000 | 0,000 | 0,091 | 0,000 | 0,141 |
| | Gutaperka | 0,338 | 0,012 | 0,208 | 0,009 | 0,636 |
| | RelyX post | 0,007 | 0,002 | 0,376 | 0,000 | 0,224 |
| | Unimetric | 0,000 | 0,000 | 0,207 | 0,000 | 0,087 |
| RelyX post | Everstick post | 0,000 | 0,524 | 0,759 | 1,000 | 1,000 |
| | GC fiber post | 0,075 | 0,995 | 0,983 | 0,543 | 1,000 |
| | Gutaperka | 0,666 | 0,996 | 1,000 | 0,960 | 0,983 |
| | Osnovni | 0,007 | 0,002 | 0,376 | 0,000 | 0,224 |
| | Unimetric post | 0,031 | 0,897 | 0,999 | 1,000 | 0,998 |
| Unimetric post | Everstick post | 0,002 | 0,987 | 0,912 | 1,000 | 1,000 |
| | GC fiber post | 1,000 | 0,995 | 0,999 | 0,687 | 1,000 |
| | Gutaperka | 0,000 | 0,628 | 1,000 | 0,898 | 0,879 |
| | Osnovni | 0,000 | 0,000 | 0,207 | 0,000 | 0,087 |
| | RelyX post | 0,031 | 0,897 | 0,999 | 1,000 | 0,998 |

Tablica 13. Rezultati univarijatne ANOVA-e kod usporedbe razvojnih stadija između različitih vrsta materijala na apikalnoj razini (Tukey HSD).

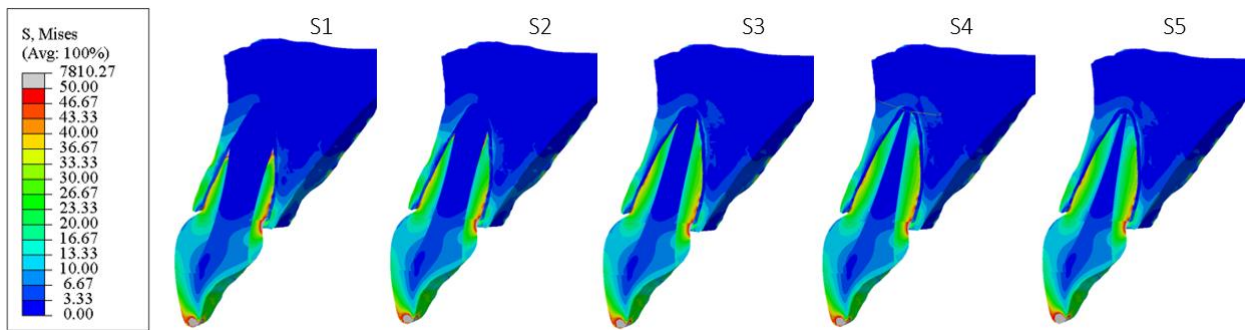
| | | p - vrijednost | | | | | |
|----------------|----|-----------------|---------------|-----------|---------|------------|----------------|
| STADIJ RAZVOJA | | APIKALNA RAZINA | | | | | |
| KORIJENA | | Everstick post | GC fiber post | Gutaperka | Osnovni | Relyx post | Unimetric post |
| S1 | S2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| | S3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S5 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| S2 | S1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| | S3 | 1,000 | 0,015 | 0,170 | 0,007 | 0,000 | 0,000 |
| | S4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S5 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| S3 | S1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S2 | 1,000 | 0,015 | 0,170 | 0,007 | 0,000 | 0,000 |
| | S4 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S5 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| S4 | S1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S5 | 0,063 | 0,032 | 0,748 | 0,016 | 0,241 | 0,243 |
| S5 | S1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S2 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S3 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | S4 | 0,063 | 0,032 | 0,748 | 0,016 | 0,241 | 0,243 |

Tablica 14. Rezultati univarijatne ANOVA-e kod usporedbe razvojnih stadija između različitih vrsta materijala na apikalnoj razini (Tukey HSD).

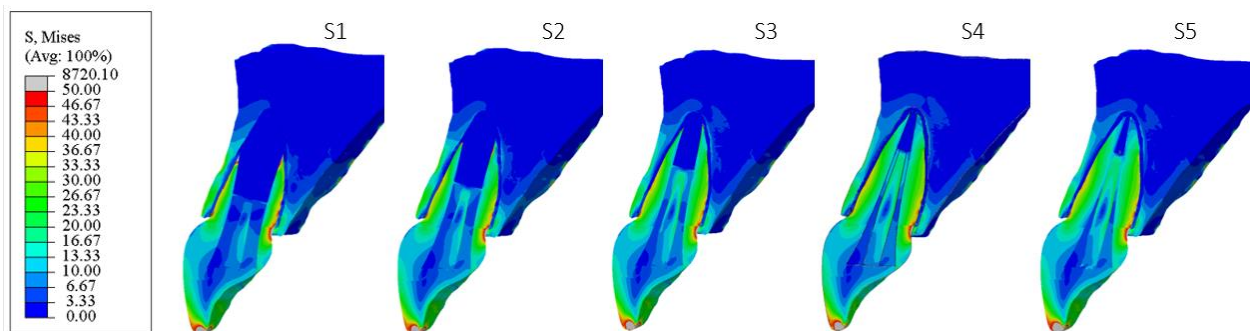
| | | p - vrijednost | | | | | |
|----------------|----|-------------------|---------------|-----------|---------|------------|----------------|
| STADIJ RAZVOJA | | CERVIKALNA RAZINA | | | | | |
| KORIJENA | | Everstick post | GC fiber post | Gutaperka | Osnovni | Relyx post | Unimetric post |
| S1 | S2 | 0,000 | 0,932 | 0,023 | 0,208 | 0,358 | 0,957 |
| | S3 | 0,000 | 0,996 | 0,001 | 0,000 | 0,216 | 0,778 |
| | S4 | 0,000 | 0,280 | 0,000 | 0,006 | 0,005 | 1,000 |
| | S5 | 0,000 | 0,998 | 0,000 | 0,000 | 0,011 | 1,000 |
| S2 | S1 | 0,000 | 0,932 | 0,023 | 0,208 | 0,358 | 0,957 |
| | S3 | 1,000 | 0,993 | 0,827 | 0,240 | 0,999 | 0,991 |
| | S4 | 1,000 | 0,046 | 0,689 | 0,707 | 0,462 | 0,898 |
| | S5 | 1,000 | 0,801 | 0,739 | 0,027 | 0,615 | 0,918 |
| S3 | S1 | 0,000 | 0,996 | 0,001 | 0,000 | 0,216 | 0,778 |
| | S2 | 1,000 | 0,993 | 0,827 | 0,240 | 0,999 | 0,991 |
| | S4 | 1,000 | 0,136 | 0,999 | 0,935 | 0,645 | 0,658 |
| | S5 | 1,000 | 0,962 | 1,000 | 0,898 | 0,788 | 0,695 |
| S4 | S1 | 0,000 | 0,280 | 0,000 | 0,006 | 0,005 | 1,000 |
| | S2 | 1,000 | 0,046 | 0,689 | 0,707 | 0,462 | 0,898 |
| | S3 | 1,000 | 0,136 | 0,999 | 0,935 | 0,645 | 0,658 |
| | S5 | 1,000 | 0,461 | 1,000 | 0,445 | 0,999 | 1,000 |
| S5 | S1 | 0,000 | 0,998 | 0,000 | 0,000 | 0,011 | 1,000 |
| | S2 | 1,000 | 0,801 | 0,739 | 0,027 | 0,615 | 0,918 |
| | S3 | 1,000 | 0,962 | 1,000 | 0,898 | 0,788 | 0,695 |
| | S4 | 1,000 | 0,461 | 1,000 | 0,445 | 0,999 | 1,000 |



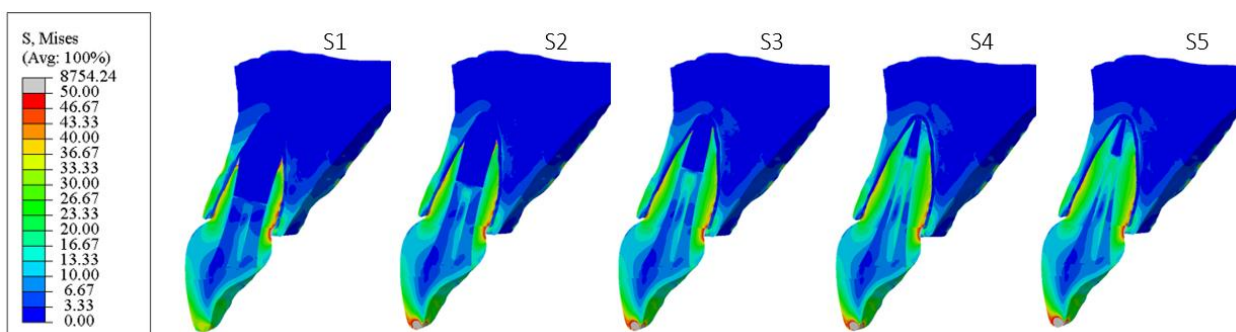
Slika 56. Osnovni model u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



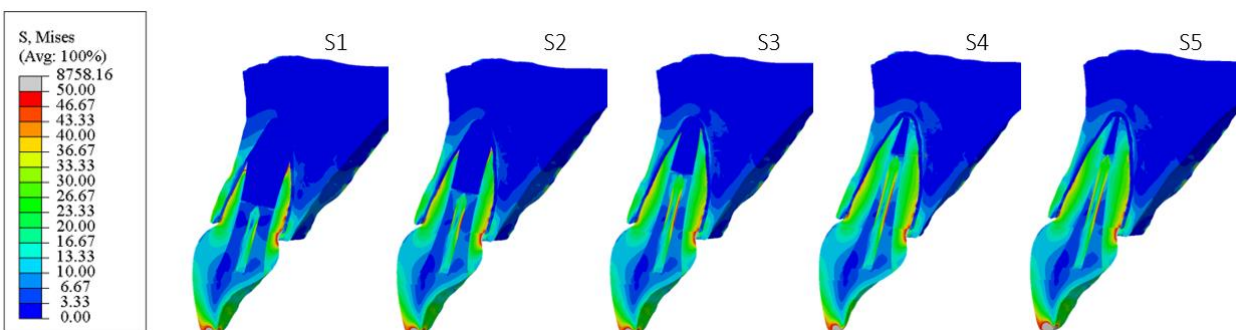
Slika 57. Model s gutaperka punjenjem u korijenskom kanalu u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



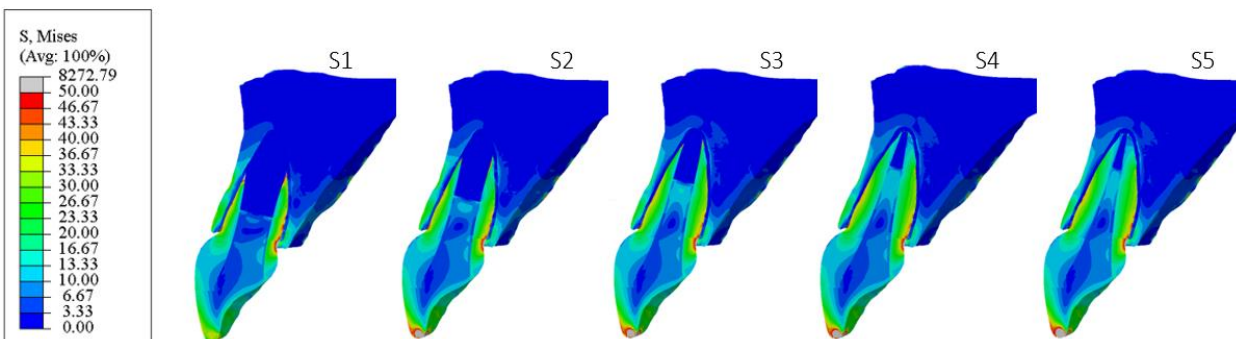
Slika 58. Model s GC fiberpost intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



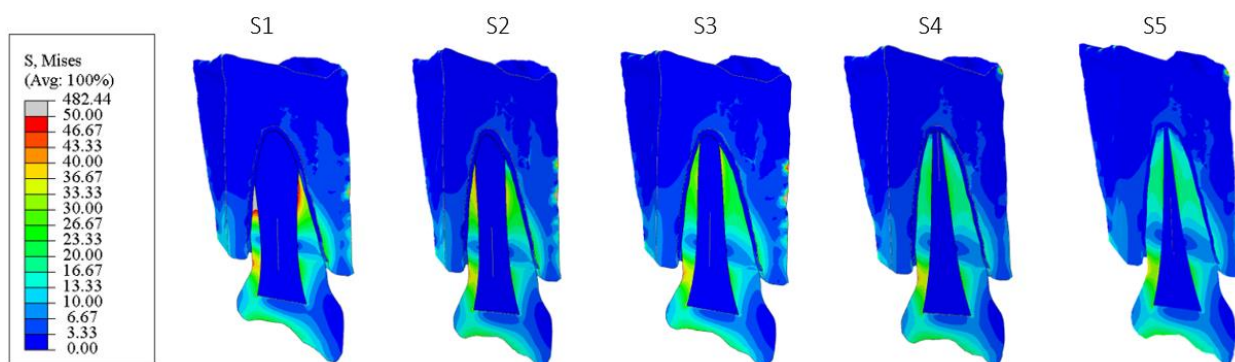
Slika 59. Model s RelyX post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



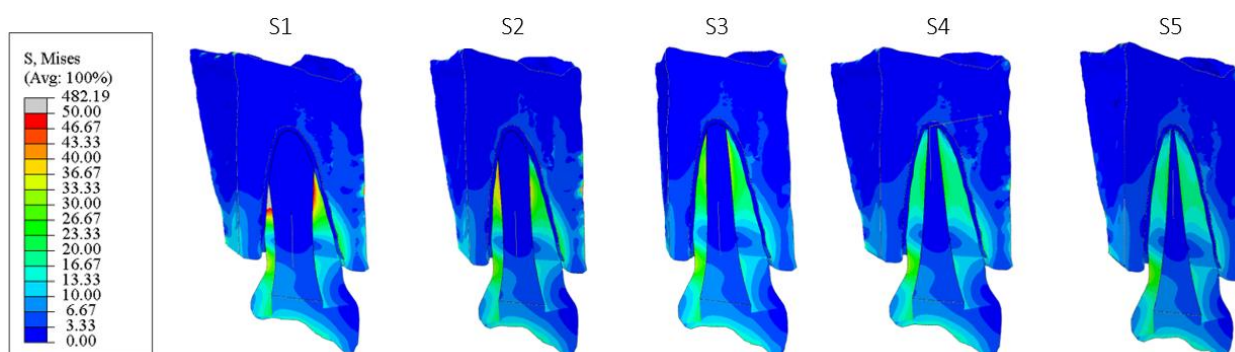
Slika 60. Model s Unimetric metal post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



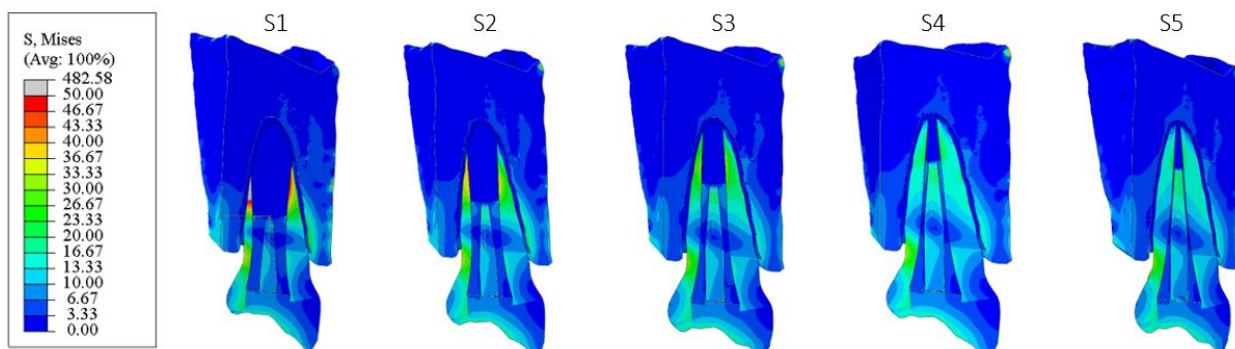
Slika 61. Model s Everstick post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - sagitalni presjek.



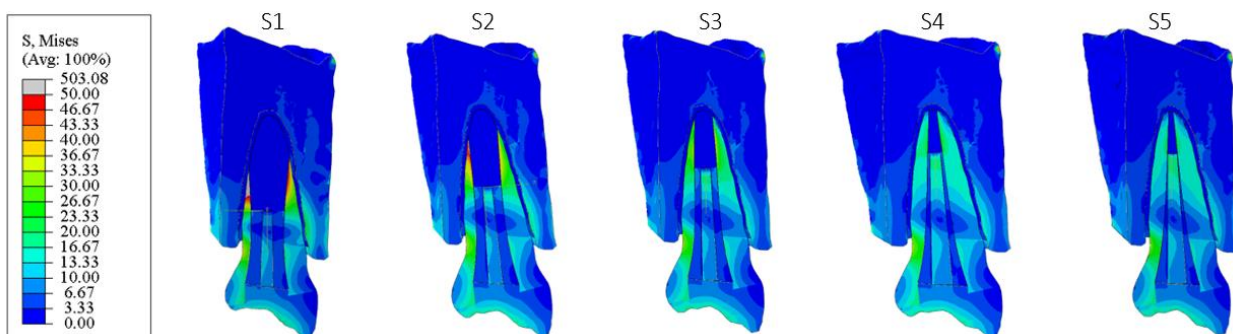
Slika 62. Osnovni model u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.



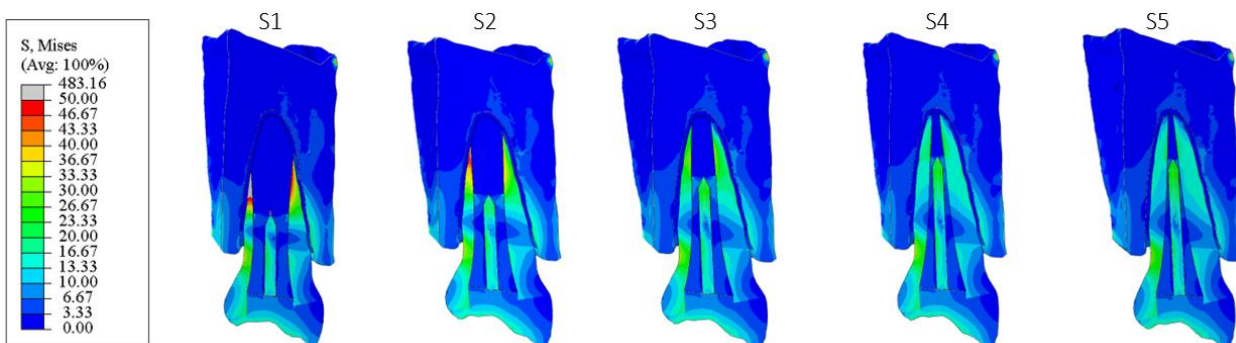
Slika 63. Model s gutaperka punjenjem u korijenskom kanalu u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.



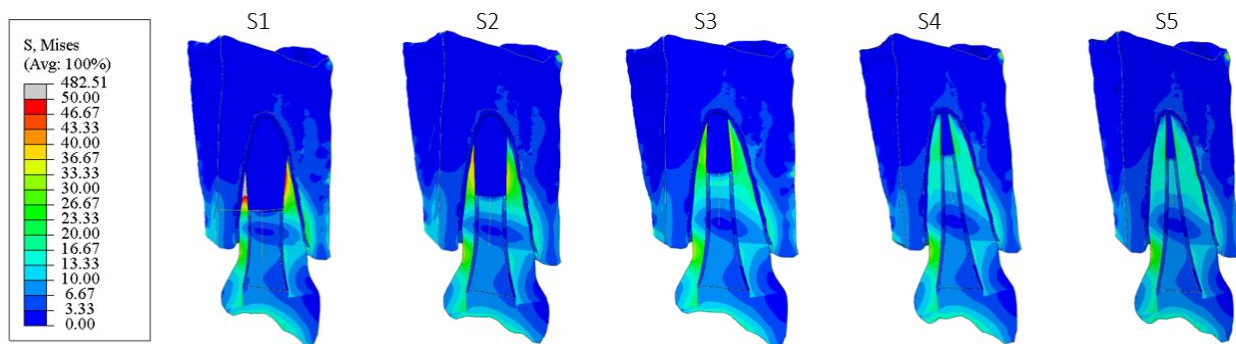
Slika 64. Model s GC fiberpost intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.



Slika 65. Model s RelyX post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.



Slika 66. Model s Unimetric metal post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.



Slika 67. Model s Everstick post intrakanalnom retencijom u odnosu na razvojni stadij korijena - frontalni presjek.

5. RASPRAVA

Mnoge su studije analizirale raspodjelu naprezanja kod endodontski oslabljenih korijenskih kanala na gornjim središnjim sjekutićima koristeći metodu konačnih elemenata, ali samo je nekoliko njih analiziralo mlade trajne sjekutiće (123–128). U tim istraživanjima korištene su različite metode za modeliranje nezrelosti pojedinog stadija ili općenito nezrelog stanja korijena bez definiranja protokola za sve razvojne stadije. S obzirom na to da u literaturi nema podataka o prosječnoj debljini dentina u odnosu na razvojni stadij korijena napravljena je pilot studija u kojoj su dobivene radiološke vrijednosti debljine za modeliranje pet osnovnih stadija. Mazzotta i sur. (129) u svojem istraživanju navode kako je moguće izraditi klinički valjani 3D model počevši od 2D informacije kod jednokorijenskih zubi na način da se meziodistalna širina korijena izmjeri na više razina unutar korijena. Sukladno tome, podaci s dvodimenzionalne snimke mogli su se koristiti za generiranje informacije o distalnoj i mezijalnoj širini korijena te također i o bukalno-oralnoj dimenziji zbog gotovo jednake udaljenosti pulpnog kanala od vanjskih rubova korijena (18). U našem istraživanju širina korijenskog dentina izmjerena je na tri razine: na razini cervikalne linije i na udaljenosti 1 mm od apeksa jer se ta područja smatraju prediktorima naprezanja (124, 130) te na razini 4 mm od apeksa budući da se u modeliranju postendodontske opskrbe zuba postavom intrakanalne retencije apikalno ostavlja 4 mm gutaperke. Dodatno, uzimajući u obzir individualnu anatomiju svakog pacijenta Plascencia i sur. (44) u svojem istraživanju navode pouzdane rezultate kod radiografske procjene različitih razvojnih stadija korijena koristeći Cvekovu klasifikaciju.

Osnovna metodologija MKE studija koje su modelirale oslabljeni ili nezreli sjekutić sastojala se od izolacije osnovnog 3D modela sa CBCT-a intaktnog ili ekstrahiranog zuba te generiranja ostalih modela u programu ili direktno na ekstrahiranom zubu prema zadanim karakteristikama (123–127). Tako su Talati i sur. (123) u jednoj od prvih MKE studija na mladom trajnom sjekutiću koristeći podatke iz literature potvrdili da je obrazac raspodjele naprezanja različit kod zubi s nezavršenim razvojem korijena. Khadar i sur. (124) u svojem su istraživanju za simulaciju nezrelog sjekutića upotrijebili ekstrahirane gornje središnje koje su dodatno instrumentirali (apikalni otvor je nakon MAF # 80 dodatno povećan na 1 mm Peeso svrdlima) te zatim skenirali. Anthrayose i sur. (125) imali su protokol i dimenzije u MKE modeliranju slične našima. Pomoću CBCT snimki i podataka iz literature u programu je simuliran treći stadij po Cvekovoj klasifikaciji s apikalnim otvorom od 1,67 mm i duljinom korijena od 10,5 mm. Eram i sur. (128) također su simulirali Cvekov treći stadij, ali

instrumentiranjem izvađenog gornjeg središnjeg sjekutića te potom CBCT skeniranjem. Njihove vrijednosti u modeliranju korijena (1,7 mm širina apikalnog otvora, 1:1 omjer korijena i korijenskog kanala na caklinsko cementnom spojištu) bile su slične našim vrijednostima osim vrijednosti duljine korijena koja je u njihovom istraživanju iznosila 9 mm. Dezzen-Gomide i sur. (126) u svojem su istraživanju simulirali tri različita stadija razvoja korijena koristeći više CBCT snimki gornjega središnjeg sjekutića: potpuno završen razvoj, nepotpuno završen razvoj u apikalnoj trećini korijena i nepotpuno završen razvoj u srednjoj trećini korijena, ali bez opisa korištenih vrijednosti u modeliranju. Bucchi i sur. (127) simulirali su regenerativni endodontski postupak u četvrtom stadiju po Cvekovoj klasifikaciji izolacijom gornjeg središnjeg sjekutića s CT-a te podjelom korijenskog dentina u programu na dva dijela; dio s tankim stjenkama i otvorenim apeksom te dio s novoformiranim tkivom unutar kanala (mehanički parametri cementa ili dentina). U navedenim MKE istraživanjima ističe se metodološka problematika u modeliranju nezrelog gornjeg središnjeg sjekutića te etičke implikacije kod procjene terapijskog postupka u *in vivo* modelu.

U daljnjem nastavku istraživanja s CBCT-a je izoliran osnovni personalizirani model gornjeg središnjeg sjekutića sa završenim razvojem korijena u djeteta dobi od 11 godina s obzirom na to da upotreba CBCT-a u MKE modeliranju omogućuje visoku točnost i detekciju okolnog tkiva za razliku od tradicionalnog pristupa ugrađivanjem izvađenog zuba u crveni epoksid, okomitim rezanjem te zatim fotografiranjem (102).

Rezultati analize konačnim elementima prikazuju kvantitativnu (numeričku) i kvalitativnu (lokacijsku) raspodjelu ekvivalentnih HMH naprezanja u kojoj grafički prikaz uz pomoć boja predstavlja raspon vrijednosti (103, 131). Verri i sur. (132) dodatno su prikazali rezultate 3D analize uzimajući 50 najvećih vrijednosti HMH naprezanja unutar kolčića i korijenskog dentina. U našem istraživanju na svim modelima najveća naprezanja javljala su se na cervikalnoj i apikalnoj razini te smo sukladno tome uzeli 80 najvećih vrijednosti na obje razine dok se srednja razina (između apikalne i cervikalne razine) nije prikazivala jer je bila statistički značajna u svim skupinama.

Usporedba naprezanja između modela u svakoj skupini na apikalnoj razini korijenskog dentina pokazala je pad od S1 prema S5 stadiju koji se i očekivao s obzirom na veću debljinu dentinskog zida u svakom sljedećem stadiju. Odstupanja u S2 i S3 stadiju mogu se objasniti različitim modeliranjem ta dva stadija. Kod S2 stadija uzimala se vrijednost razvoja dvije trećine

korijena dok se za S3 stadij uzimao raspon između S2 i S4 stadija što je moglo utjecati na veću varijabilnost u modeliranju. Također, blaži pad u koncentraciji naprezanja od S1 prema S5 stadiju zabilježen je i na cervikalnoj razini s obzirom da su razlike u debljini dentina između stadija puno manje nego u apikalnom području.

Najveće naprezanje bilo je na cervikalnoj razini kod većine modela što je u skladu s mnogim istraživanjima iz literature (56, 69, 128, 133–136). Eram i sur. (128) navode najveće naprezanje na cervikalnoj razini prilikom MKE analize i usporedbe terapijskog postupka postavom apikalnog stopa između tri različita materijala na nezrelom trajnom sjekutiću. U istraživanju Ferrari i sur. (69) najveće vrijednosti naprezanja zabilježene su na bukalnoj strani cervikalnog područja korijena za sve modele s kompozitnim kolčićem ojačanim staklenim vlaknima dok Nokar i sur. (131) navode najveću koncentraciju naprezanja kod modela s FRC kolčićem između srednje i cervikalne trećine korijena završenog razvoja. Okamoto i sur. (134) navode najveće naprezanje na unutarnjoj strani cervikalne razine bez obzira na promjer FRC kolčića. Mafda i sur. (56) navode cervikalno i apikalno područje kao mjesto inicijacije neuspjeha zbog visokog naprezanja između kolčića i ostalih materijala u dodiru. Gurbuz i sur. (135) također navode najveće naprezanje unutar korijenskog dentina u cervikalnom području, ali na mliječnim središnjim sjekutićima kada se različiti kompozitni materijali koriste za oblikovanje kratkog kolčića i jezgre. Njihove najveće vrijednosti naprezanja (83,0 - 85,8 MPa) bile su veće od naših na istoj razini (59,44 - 63,00 MPa). Razlog tome može biti u drugačijim anatomskim svojstvima, prvenstveno puno većem omjeru krune i korijena kod mliječnog GSS-a te kratkoj duljini kompozitnog materijala u funkciji kolčića kao i lošijim mehaničkim svojstvima za razliku od FRC kolčića. U istraživanju Kumar i sur. (136) područje najvećeg naprezanja nalazilo se na unutarnjoj strani proksimalnog zida u razini cervikalnog dijela zuba kod kolčića ojačanih staklenim vlaknima (15,37 MPa kod FRC promjera 1,2 mm i 15,33 MPa kod FRC promjera 1,4 mm), a kod metalne intrakanalne retencije na unutarnjoj strani apikalnog dijela kolčića (15,018 MPa kod metalnog kolčića promjera 1,2 mm i 14,925 MPa kod promjera 1,4 mm) na MKE modelu GSS-a završenog razvoja korijena te smo zato njihove vrijednosti mogli usporediti samo s našim S5 stadijem (58,815 MPa na cervikalnoj razini i 12,512 MPa na apikalnoj razini za GFP model, te 58,664 MPa na cervikalnoj razini i 15,177 MPa na apikalnoj razini za UMP model). Zanimljivo je kako se njihove vrijednosti podudaraju s našim na apikalnoj razini dok su na cervikalnoj razini 3 do 4 puta veće. Razlog tome može opet biti u različitom pristupu

modeliranja GSS-a. U njihovom istraživanju MKE model konstruiran je skeniranjem ekstrahiranog GSS-a u osobe odrasle dobi dok je u našem istraživanju MKE model nastao izolacijom sa CBCT-a djeteta u dobi od 11 godina. Iz navedenih istraživanja može se zaključiti da se naprezanje kod postendodontske terapije na gornjem središnjem sjekutiću najčešće javlja u cervikalnom području bez obzira na razlike u modeliranju i stadij razvoja korijena kada se općenito opisuje nezrelost korijena. No, u literaturi nema podataka o vrlo ranim stadijima razvoja korijena. U našem istraživanju u tim stadijima najveće naprezanje nalazilo se u apikalnom području s obzirom na to da su puno veće promjene u debljini korijenskog dentina te smo mišljenja da će daljnja istraživanja potvrditi navedeni obrazac raspodjele napreznja. Također, zbog navedenih razlika u geometrijskom modeliranju vrijednosti napreznja nisu uvijek bile usporedive što ističe nužnost zajedničkog konsensusa oko protokola.

Usporedba modela intaktnog zuba i modela samo s punjenjem u korijenskom kanalu nije pokazala značajne razlike u koncentraciji napreznja unutar korijenskog dentina što potvrđuje da samo endodontsko liječenje ne ugrožava stabilnost zuba već koronarna MOD preparacija kako se i navodi u literaturi (59, 60). Također, usporedba modela samo s punjenjem u korijenskom kanalu s modelima koji imaju intrakanalnu retenciju u S4 i S5 stadiju, u kojima se i klinički najviše koriste, pokazala je neznatne razlike u koncentraciji napreznja i na cervikalnoj i na apikalnoj razini korijenskog dentina što ide u prilog minimalno invazivnog postendodontskog pristupa te potrebi za dobrom procjenom korisnosti same intrakanalne retencije. Alshabib i sur. (58) izvijestili su da već postoji trend prema korištenju endokrunica, odnosno krunica i većih onleja koji ne koriste sustav kolčića i jezgre, već kutijastu preparaciju i ekstruziju krunice ili onleja. Poznata rasprava među kliničarima “*To post or not to post?*“ (80–82)) već dugi niz godina ne dovodi do zajedničkog stajališta posebno u slučaju mladih trajnih zuba kod kojih je vrlo teško provesti istraživanje te se metoda konačnih elemenata pokazuje dobrim alatom za usmjeravanje kod izbora terapijskih postupaka (66, 63).

Svi modeli razvoja korijena s GC fiber post intrakanalnom retencijom imali su manja napreznja unutar korijenskog dentina u usporedbi s RelyX post intrakanalnom retencijom na apikalnoj razini što ide u prilog bolje geometrije GC fiber posta koji koristi kombinirani pristup cilindrične osnove koronarno te konusnog završetka apikalno čime se prirodnije prati anatomija zuba (57, 61, 65).

Bio je zanimljiv nalaz koncentracije naprezanja unutar korijenskog dentina u skupini s metalnom intrakanalnom retencijom kod koje nema većih odstupanja u usporedbi s ostalim sustavima suprotno mnogim navodima iz literature (72, 137, 138). Iako, neka MKE istraživanja pokazuju da se veća naprezanja nalaze kod kompozitnog kolčića ojačanog staklenim vlaknima za razliku od metalnog kolčića (133, 136). U istraživanju Kumar i sur. (136) to se naprezanje smanjivalo povećavanjem promjera kompozitnog kolčića što ide u prilog individualnom sustavu kolčića i jezgre kao i u istraživanju Nokar i sur. (133) koji više preporučuju lijevane metalne nadogradnje. U oba istraživanja 3D model gornjeg središnjeg sjekutića imao je završen razvoj korijena. U obzir treba uzeti to da je u našem istraživanju napravljena statička i dinamička analiza pri zagrizu, a za evaluaciju ponašanja kroz duži vremenski period potrebno je cikličko mehaničko opterećenje kod kojeg bi se očekivale puno veće koncentracije naprezanja budući da je sama veza metalne intrakanalne retencije s kompozitnim cementom puno slabija te su češće nepopravljive frakture korijena (ispod razine kosti) zbog visokog modula elastičnosti (79, 80).

Usporedba individualne (ESP model) i konfekcijske (GFP model) estetske intrakanalne retencije pokazala je neznatne razlike u koncentriranju naprezanja unutar korijenskog dentina osim u S1 stadiju na apikalnoj razini u kojoj je bilo značajno niže kod ESP modela. Everstick post ne zahtijeva dodatno uklanjanje tvrdog zubnog tkiva i za razliku od ostalih estetskih kolčića jedini je koji se prilagođava obliku kanala odnosno ima individualna geometrijska svojstva. Također, relativno je noviji sustav čija pripadajuća mehanička svojstva potrebna za MKE analizu nisu dovoljno istraživana u literaturi. Gomes i sur. (139) u svojoj studiji izvještavaju o nepouzdanosti MKE rezultata kod neodgovarajućih vrijednosti mehaničkih svojstava struktura i/ili materijala. Mišljenja smo da su potrebna dodatna istraživanja za dobivanje točnijih vrijednosti za sustav Everstick posta koja zahtijevaju složene i dugotrajne laboratorijske tehnike. Također, kod modeliranja u obzir treba uzeti i individualne geometrijske karakteristike kolčića o kojima najviše ovise rezultati naprezanja.

Zaključno se potvrđuju obje postavljene hipoteze osim u najranijem stadiju razvoja korijena u kojem se veće HMH naprezanje nalazilo na apikalnoj razini.

Ova studija ima neka ograničenja. Za istraživanje je korišten jedan CBCT kako bi se dobio personalizirani osnovni model zuba sa završenim razvojem korijena dok su stadiji razvoja korijena i terapijski postupci modelirani prema podacima iz literature i mjerenjem dentinskog

zida na intraoralnim rendgenskim snimkama. Bolja obilježja modela postigla bi se s CBCT-om koji prati rast i razvoj zuba kod istog pacijenta što bi kod djece bilo etički vrlo upitno. Sve su komponente modela modelirane kao linearno elastične i izotropne što znači da numerička simulacija nije bila apsolutno vjerna realnom modelu koji predstavlja strukture, materijale i zubno tkivo *in vivo*. U obzir se uzimala savršena adhezivna veza između materijala. Primijenjena mehanička svojstva struktura i materijala preuzeta su iz širokog raspona objavljenih istraživanja te je potrebno napraviti dodatna ispitivanja kako bi se dobile preciznije vrijednosti. Konačno, u literaturi nije bilo podataka s kojima bi se u potpunosti mogli usporediti naši rezultati s obzirom na to da niti jedno istraživanje nema isti protokol u modeliranju nezrelosti korijena, niti su evaluirani svi stadiji razvoja korijena kod gornjeg središnjeg sjekutića. Time zapravo naši rezultati daju jedinstveni doprinos ovom području znanosti.

6. ZAKLJUČAK

Unatoč ograničenjima ovog istraživanja, može se zaključiti kako se najveće ekvivalentno HMH naprezanje kod mladog trajnog gornjega središnjeg sjekutića nalazilo na cervikalnoj razini osim u početnom razvoju jedne polovine korijena, kada je naprezanje bilo veće na apikalnoj razini. Napredovanjem razvoja korijena odnosno povećavanjem debljine dentinskog zida HMH naprezanje se generalno smanjivalo kod svih modela. Postendodontska opskrba zuba postavom intrakanalne retencije nije smanjivala razvoj HMH naprezanja unutar korijenskog dentina. Eversstick post pokazao se najboljim izborom materijala u ranijim stadijima razvoja korijena, a GC fiberpost u kasnijim stadijima razvoja korijena na cervikalnoj razini. Geometrija kolčića koja koristi kombinirani pristup cilindrične osnove koronarno te konusnog završetka apikalno pokazala se boljim izborom u odabiru estetske konfekcijske intrakanalne retencije u odnosu na potpuno konusnu geometriju kolčića. Metalna intrakanalna retencija nije pokazala značajno veći razvoj HMH naprezanja unutar korijenskog dentina.

Protokol prilikom analize metodom konačnih elemenata pri modeliranju stadija razvoja korijena koji je koristio srednje vrijednosti odabranih parametara debljine zubnog korijena za gornji središnji sjekutić mogao bi se koristiti za modeliranje terapijskih postupaka, no potrebna su daljnja istraživanja.

7. LITERATURA

1. Lam R. Epidemiology and outcomes of traumatic dental injuries: a review of the literature. *Aust Dent J.* 2016;61(S1):420.
2. Vasanthakumari A, Selvabalaji A, Ekambareswaran K, Anagha C, Swetha Rk, Ishwarya M. Knowledge, Awareness, and Practice Regarding Management of Dental Trauma in Children among Dental Practitioners: A Cross-sectional Survey. *J Contemp Dent Pract.* 2022;23(10):1033-8.
3. Bourguignon C, Cohenca N, Lauridsen E, Flores MT, O'Connell AC, Day PF, et al. International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: 1. Fractures and luxations. *Dent Traumatol.* 2020;36(4):314-30.
4. Levin L, Day PF, Hicks L, O'Connell A, Fouad AF, Bourguignon C, et al. International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: General introduction. *Dent Traumatol.* 2020;36(4):309-13.
5. El-Kalla IH, Shalan HM, Bakr RA. Impact of Dental Trauma on Quality of Life Among 11–14 Years Schoolchildren. *Contemp Clin Dent.* 2017;8(4):538-44.
6. Moolla A. The Impact of Traumatic Dental Injuries on the Mental and Social Well-Being of Children and Adolescents: Recommendations for Patient Management. In: *Dental Trauma and Adverse Oral Conditions - Practice and Management Techniques [Internet]*. IntechOpen; 2023 [cited 2023 Dec 14]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/85974>
7. Andreasen J, Andreasen F, Bakland L, Flores M. Traumatske ozljede zubi. 2. izd. Dukić W, editor. Jastrebarsko: Naklada Slap; 2008. 88 p.
8. Jurić H. Dječja dentalna medicina. Jastrebarsko: Naklada Slap; 2015. 512 p.
9. Soares CJ, Rodrigues M de P, Faria-E-Silva AL, Santos-Filho PCF, Veríssimo C, Kim HC, et al. How biomechanics can affect the endodontic treated teeth and their restorative procedures? *Braz Oral Res.* 2018;32(1):e76.

10. Cvek M. Prognosis of luxated non-vital maxillary incisors treated with calcium hydroxide and filled with gutta-percha. A retrospective clinical study. *Endod Dent Traumatol.* 1992;8(2):45-55.
11. Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol.* 2002;18(3):134-7.
12. Al-Jundi SH. Type of treatment, prognosis, and estimation of time spent to manage dental trauma in late presentation cases at a dental teaching hospital: a longitudinal and retrospective study. *Dent Traumatol.* 2004;20(1):1-5.
13. Rodd H, Noble F. Psychosocial Impacts Relating to Dental Injuries in Childhood: The Bigger Picture. *Dent J.* 2019;7(1):23.
14. Hassouneh L, Matoug-Elwerfelli M, Al-Omari T, Setzer FC, Nagendrababu V. Assessment of biomechanical behavior of immature non-vital incisors with various treatment modalities by means of three-dimensional quasi-static finite element analysis. *Sci Rep.* 2023;13(1):17491.
15. Škrinjarić I. Traume zuba. Zagreb: Globus; 1988. 486 p.
17. Li J, Parada C, Chai Y. Cellular and molecular mechanisms of tooth root development. *Dev Camb Engl.* 2017;144(3):374-84.
18. Torabinejad M, Walton R. *Endodoncija: Načela i praksa.* 4th ed. Anić I, editor. Zagreb: Naklada Slap; 2009. 458 p.
19. Šutalo J. *Patologija i terapija tvrdih zubnih tkiva.* Zagreb: Naklada Zadro; 1994. 538 p.
20. Kwon HJE, Jiang R. Development of Teeth. In: *Reference Module in Biomedical Sciences* [Internet]. Elsevier; 2018 [cited 2024 Feb 2]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128012383641132>
21. American Dental Association. Tooth eruption: The permanent teeth. *JADA.* 2006;137:127.

22. Glendor U. Epidemiology of traumatic dental injuries-a 12 year review of the literature. *Dent Traumatol.* 2008;24(6):603-11.
23. Tewari N, Bansal K, Mathur VP. Dental Trauma in Children: A Quick Overview on Management. *Indian J Pediatr.* 2019;86(11):1043-7.
24. Maheu-Robert LF, Andrian E, Grenier D. Overview of complications secondary to tongue and lip piercings. *J Can Dent Assoc.* 2007;73(4):327-31.
25. Levin L, Zadik Y, Becker T. Oral and dental complications of intra-oral piercing. *Dent Traumatol.* 2005;21(6):341-3.
26. Zaleckiene V, Peciuliene V, Brukiene V, Drukteinis S. Traumatic dental injuries: etiology, prevalence and possible outcomes. *Stomatologija.* 2014;16(1):7-14.
27. Goyal N, Singh S, Mathur A, Makkar DK, Aggarwal VP, Sharma A, et al. Traumatic Dental Injuries Prevalence and their Impact on Self-esteem among Adolescents in India: A Comparative Study. *J Clin Diagn Res.* 2017;11(8):ZC106-10.
28. Maloney K. Circummandibular Wires for Treatment of Dentoalveolar Fractures Adjacent to Edentulous Areas: A Report of Two Cases. *Craniofacial Trauma Reconstr.* 2015;8(3):246-50.
29. Olsen J. Finite Element Analysis of Maxillary Central Incisor Trauma [dissertation]. Chapel Hill: University of North Carolina; 2013. 33 p.
30. Andreasen J, Andreasen F, Andersson L. Text-book and Colour Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth. 5th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell; 2018. 1064 p.
31. Petti S, Andreasen JO, Glendor U, Andersson L. NA0D – The new Traumatic Dental Injury classification of the World Health Organization. *Dent Traumatol.* 2022;38(3):170-4.
32. Day PF, Barber SK. Review of the dental trauma guide; an interactive guide to evidence-based trauma management. *Evid Based Dent.* 2011;12(4):117-20.

33. Liddel G, Carmichael G. The restoration of traumatized teeth. *Aust Dent J.* 2016;61(1):107-19.
34. Robertson A, Andreasen FM, Andreasen JO, Norén JG. Long-term prognosis of crown-fractured permanent incisors. The effect of stage of root development and associated luxation injury. *Int J Paediatr Dent.* 2000;10(3):191-9.
35. Bissinger R, Müller DD, Reymus M, Khazaei Y, Hickel R, Bücher K, et al. Treatment outcomes after uncomplicated and complicated crown fractures in permanent teeth. *Clin Oral Investig.* 2021;25(1):133-43.
36. Reddy LV, Bhattacharjee R, Misch E, Sokoya M, Ducic Y. Dental Injuries and Management. *Facial Plast Surg FPS.* 2019;35(6):607-13.
37. Ojeda-Gutierrez F, Martinez-Marquez B, Arteaga-Larios S, Ruiz-Rodriguez MS, Pozos-Guillen A. Management and Followup of Complicated Crown Fractures in Young Patients Treated with Partial Pulpotomy. *Case Rep Dent.* 2013;2013:597563.
38. Tzanetakis GN, Tsiouma O, Mougou E, Koletsi D. Factors Related to Pulp Survival After Complicated Crown Fracture Following Vital Pulp Therapy: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Endod.* 2022;48(4):457-78.e4.
39. Seyam RS, Mobarak EH. Reinforcement of teeth with simulated coronal fracture and immature weakened roots using resin composite cured by a modified layering technique. *Oper Dent.* 2014;39(3):E128-36.
40. Çiçek E, Yılmaz N, Koçak MM, Sağlam BC, Koçak S, Bilgin B. Effect of Mineral Trioxide Aggregate Apical Plug Thickness on Fracture Resistance of Immature Teeth. *J Endod.* 2017;43(10):1697-700.
41. Nazzal H, Duggal MS. Regenerative endodontics: a true paradigm shift or a bandwagon about to be derailed? *Eur Arch Paediatr Dent.* 2017;18(1):3-15.
42. Zhou C, Yuan Z, Xu H, Wu L, Xie C, Liu J. Regenerative Endodontic Procedures in Immature Permanent Teeth With Dental Trauma: Current Approaches and Challenges.

- Front Dent Med [Internet]. 2022 Feb 8 [cited 2024 Mar 12];2. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdmed.2021.767226>
43. Duggal M, Tong HJ, Al-Ansary M, Twati W, Day PF, Nazzal H. Interventions for the endodontic management of non-vital traumatised immature permanent anterior teeth in children and adolescents: a systematic review of the evidence and guidelines of the European Academy of Paediatric Dentistry. *Eur Arch Paediatr Dent*. 2017;18(3):139-51.
 44. Plascencia H, Díaz M, Gascón G, Garduño S, Guerrero-Bobadilla C, Márquez-De Alba S, et al. Management of permanent teeth with necrotic pulps and open apices according to the stage of root development. *J Clin Exp Dent*. 2017;9(11):e1329-39.
 45. Dikbas I, Tanalp J, Koksall T, Yalnız A, Güngör T. Investigation of the effect of different prefabricated intracanal posts on fracture resistance of simulated immature teeth. *Dent Traumatol*. 2014;30(1):49-54.
 46. Bučević Sojčić P, Pavelić I, Jurić H. Terapijski postupak revaskularizacije. In: Vulićević ZR, Radović I, editors. *Endodontska terapija mladih stalnih zuba*. 1. izd. Beograd: Stomatološki fakultet, Univerzitet u Beogradu; 2019. p. 156-64.
 47. Linsuwanont P, Kulvitit S, Santiwong B. Reinforcement of Simulated Immature Permanent Teeth after Mineral Trioxide Aggregate Apexification. *J Endod*. 2018;44(1):163-7.
 48. Wikström A, Brundin M, Mohmud A, Anderson M, Tsilingaridis G. Outcomes of apexification in immature traumatised necrotic teeth and risk factors for premature tooth loss: A 20-year longitudinal study. *Dent Traumatol*. 2024 Jun 5. Online ahead of print.
 49. Namour M, Theys S. Pulp revascularization of immature permanent teeth: a review of the literature and a proposal of a new clinical protocol. *ScientificWorldJournal*. 2014;2014:737503.
 50. Alghamdi FT, Alqurashi AE. Regenerative Endodontic Therapy in the Management of Immature Necrotic Permanent Dentition: A Systematic Review. *ScientificWorldJournal*. 2020;2020:7954357.

51. Wei X, Yang M, Yue L, Huang D, Zhou X, Wang X, et al. Expert consensus on regenerative endodontic procedures. *Int J Oral Sci.* 2022;14(1):55.
52. Kratunova E, Silva D. Pulp therapy for primary and immature permanent teeth: an overview. *Gen Dent.* 2018;66(6):30-8.
53. American Academy of Pediatric Dentistry. Pulp Therapy for Primary and Immature Permanent Teeth. *Ref Man Pediatr Dent.* 2023;457-65.
54. Dikbas I, Tanalp J. An Overview of Clinical Studies on Fiber Post Systems. *Sci World J.* 2013;2013:171380.
55. Santos Filho PCF, Soares PV, Reis BR, Veríssimo C, Soares CJ. Effects of threaded post placement on strain and stress distribution of endodontically treated teeth. *Braz Oral Res.* 2013;27(4):305-10.
56. Madfa AA, Al-Hamzi MA, Al-Sanabani FA, Al-Qudaimi NH, Yue XG. 3D FEA of cemented glass fiber and cast posts with various dental cements in a maxillary central incisor. *SpringerPlus.* 2015;4:598.
57. Machado J, Almeida P, Fernandes S, Marques A, Vaz M. Currently used systems of dental posts for endodontic treatment. *Procedia Struct Integr.* 2017;5:27-33.
58. Alshabib A, Abid Althaqafi K, AlMoharib HS, Mirah M, AlFawaz YF, Algamaiah H. Dental Fiber-Post Systems: An In-Depth Review of Their Evolution, Current Practice and Future Directions. *Bioeng Basel Switz.* 2023;10(5):551.
59. Peroz I, Blankenstein F, Lange KP, Naumann M. Restoring endodontically treated teeth with posts and cores-A review. *Quintessence Int Berl Ger 1985.* 2005 Nov 1;36:737-46.
60. Kalra D, Sukhija D, Rassawet RR, Rani D. A Review on Post and Core. *Sch J Dent Sci.* 2020;07:51-6.
61. Bonchev A, Radeva E, Tsvetanova N. Fiber Reinforced Composite Posts-A Review of Literature. *Int J Sci Res.* 2017;6(10):1887-93.

62. Oh S, Jang JH, Kim HJ, Seo NS, Byun SH, Kim SW, et al. Long-term Follow-up of Complicated Crown Fracture With Fragment Reattachment: Two Case Reports. *Oper Dent*. 2019;44(6):574-80.
63. Vikhe DM. Restoration of Endodontically Treated Teeth. In: Moolla A. *Clinical Concepts and Practical Management Techniques in Dentistry* [Internet]. IntechOpen; 2021 [cited 2024 Mar 17]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/76852>
64. Zicari F, De Munck J, Scotti R, Naert I, Van Meerbeek B. Factors affecting the cement-post interface. *Dent Mater*. 2012;28(3):287-97.
65. Goracci C, Ferrari M. Current perspectives on post systems: a literature review. *Aust Dent J*. 2011;56(1):77-83.
66. Shetty PP, Meshramkar R, Patil KN, Nadiger RK. A finite element analysis for a comparative evaluation of stress with two commonly used esthetic posts. *Eur J Dent*. 2013;7(4):419-22.
67. Haralur SB. Fracture resistance of endodontically treated teeth restored with various esthetic posts. *Technol Health Care*. 2021;29(2):243-52.
68. Chirila M, Dimitriu B, Bartok RI, Amza O, Serban AM, Suci I. Fracture resistance of endodontically treated teeth restored with resin post reinforced with glass fiber. *J Med Life*. 2021;14(1):81-5.
69. Ferrari M, Sorrentino R, Zarone F, Apicella D, Aversa R, Apicella A. Non-linear viscoelastic finite element analysis of the effect of the length of glass fiber posts on the biomechanical behaviour of directly restored incisors and surrounding alveolar bone. *Dent Mater J*. 2008;27(4):485-98.
70. de Andrade GS, Saavedra G de SFA, Augusto MG, Leon GA, Brandão HCB, Tribst JPM, et al. Post-endodontic restorative treatments and their mechanical behavior: A narrative review. *Dent Rev*. 2023;3(1):100067.

71. Stevenson III RG. Best practices. In: Termeie DA. Avoiding and Treating Dental Complications [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2016 [cited 2024 Mar 22]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118988053.ch1>
72. Coelho CS de M, Biffi JCG, Silva GR da, Abrahão A, Campos RE, Soares CJ. Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts. *Dent Mater J*. 2009;28(6):671-8.
73. Almaroof AG, Thyab SA, Ali AH. Bond strength of a new Kevlar fiber-reinforced composite post with semi-interpenetrating polymer network (IPN) matrix. *J Clin Exp Dent*. 2019;11(8):e695-700.
74. Yang A, Lamichhane A, Xu C. Remaining coronal dentin and risk of fiber-reinforced composite post-core restoration failure: a meta-analysis. *Int J Prosthodont*. 2015;28(3):258-64.
75. Adanir N, Belli S. Evaluation of Different Post Lengths' Effect on Fracture Resistance of a Glass Fiber Post System. *Eur J Dent*. 2008;2:23-8.
76. Parčina I, Amižić, Baraba A. Esthetic Intracanal Posts. *Acta Stomatol Croat*. 2016;50(2):143-50.
77. Mishra R, Shetty V, D'Costa V, Shetty H. Evolution of Posts - From Rigidity to Flexibility. *Int J Sci Res IJSR*. 2017;6:2671-7.
78. de Moraes DC, Butler S, Santos MJMC. Current Insights on Fiber Posts: A Narrative Review of Laboratory and Clinical Studies. *Dent J*. 2023;11(10):236.
79. Jitumori RT, Bittencourt BF, Reis A, Gomes JC, Gomes GM. Effect of Root Canal Irrigants on Fiber Post Bonding Using Self-adhesive Composite Cements. *J Adhes Dent*. 2019;21(6):537-44.
80. Aurélio IL, Fraga S, Rippe MP, Valandro LF. Are posts necessary for the restoration of root filled teeth with limited tissue loss? A structured review of laboratory and clinical studies. *Int Endod J*. 2016;49(9):827-35.

81. Josic U, Radovic I, Juloski J, Beloica M, Popovic M, Alil A, et al. Can Fiber-post Placement Reinforce Structurally Compromised Roots? *J Adhes Dent.* 2020;22(4):409-14.
82. Carvalho MA de, Lazari PC, Gresnigt M, Del Bel Cury AA, Magne P. Current options concerning the endodontically-treated teeth restoration with the adhesive approach. *Braz Oral Res.* 2018;32(Suppl 1):e74.
83. Mangoush E, Säilynoja E, Prinssi R, Lassila L, Vallittu PK, Garoushi S. Comparative evaluation between glass and polyethylene fiber reinforced composites: A review of the current literature. *J Clin Exp Dent.* 2017;9(12):e1408-17.
84. Parčina Amižić I, Baraba A, Ionescu AC, Brambilla E, Van Ende A, Miletić I. Bond Strength of Individually Formed and Prefabricated Fiber-reinforced Composite Posts. *J Adhes Dent.* 2019;21(6):557-65.
85. Ozkurt Z, Işeri U, Kazazoğlu E. Zirconia ceramic post systems: a literature review and a case report. *Dent Mater J.* 2010;29(3):233-45.
86. Amin WM, Al-Huniti NS, Amin UW, Abu-Awad MA, Amin SW, Abousy YA. Influence of Root Posts and Retained Coronal Dentin on Fracture Resistance and Failure Pattern of Endodontically Treated Maxillary Incisors. *J Curr Surg.* 2013;3(2):73-81.
87. Garbin CA, Spazzin AO, Meira-Júnior AD, Loretto SC, Lyra AMVC, Braz R. Biomechanical behaviour of a fractured maxillary incisor restored with direct composite resin only or with different post systems. *Int Endod J.* 2010;43(12):1098-107.
88. Jain DP, S DL, S DV. Endodontically treated teeth with custom cast post and core and metal ceramic crowns restoration: A case report. *Int J Appl Dent Sci.* 2021;7(3):16-9.
89. VÄrlan C, Dimitriu B, VÄrlan V, Bodnar D, Suci I. Current opinions concerning the restoration of endodontically treated teeth: basic principles. *J Med Life.* 2009;2(2):165-72.
90. Burgess JO, Ghuman T, Cakir D. Self-adhesive resin cements. *J Esthet Restor Dent Am.* 2010;22(6):412-9.

91. Prado M, Marques JN, Pereira GD, da Silva EM, Simão RA. Evaluation of different surface treatments on fiber post cemented with a self-adhesive system. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2017;77:257-62.
92. Roudsari RV, Jawad S, Taylor C, Darcey J, Qualtrough A. Modern Endodontic Principles. Part 8: The Future of Endodontics. *Dent Update.* 2016;43(5):430-41.
93. Nair.K R, Geetha P, Veedu R, George E, Joseph M. Management of an Oblique Crown Fracture of an Anterior Tooth with a Missed Coronal Segment: A Case Report. *Conserv Dent Endod J.* 2019;4:21-4.
94. da Fonseca JTAF, Reis JAA, Ribeiro CMZF. Biomimetic approach to extensive fracture of anterior teeth--a case report. *Dent Traumatol.* 2012;28(3):247-53.
95. Bandela V, Kanaparthi S. Finite Element Analysis and Its Applications in Dentistry. In: Byccouch M. *Finite Element Analysis and Their Applications* [Internet]. IntechOpen; 2020 [cited 2024 Mar 20]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/74006>
96. Trivedi S. Finite element analysis: A boon to dentistry. *J Oral Biol Craniofacial Res.* 2014;4(3):200-3.
97. Čatić A. Analiza djelovanja žvačnih sila na zub i metal-keramičku krunicu metodom konačnih elemenata [dissertation]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Stomatološki fakultet; 2005. 138 p.
98. Gomes EA, Diana HH, Oliveira JS, Silva-Sousa YTC, Faria ACL, Ribeiro RF. Reliability of FEA on the Results of Mechanical Properties of Materials. *Braz Dent J.* 2015;26(6):667-70.
99. Sorić J. Metoda konačnih elemenata. Zagreb: Golden marketing – Tehnička knjiga; 2021. 664 p.
100. Korade I. Izračun otpora krovne kutije montirane na osobni automobil [diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2009. 65 p.

101. Meštrović S, Šljaj M, Mikšić M. Raščlamba naprežanja i deformacija nastalih djelovanjem ortodontske sile na zub metodom konačnih elemenata. *Acta Stomat Croat.* 2002;36(2):167-74.
102. Borcic J, Braut A. Finite Element Analysis in Dental Medicine. In: Ebrahimi F. *Finite Element Analysis – New Trends and Developments* [Internet]. IntechOpen; 2011 [cited 2024 Apr 21]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/39767>
103. Meira JBC, Jikihara AN, Capetillo P, Roscoe MG, Cattaneo PM, Ballester RY. Finite Element Analysis in Dentistry. In: Sacher E, Franca R. *Dental Biomaterials* [Internet]. World Scientific; 2018 [cited 2024 May 21]. p. 67-89. Available from: https://www.researchgate.net/publication/329654233_Finite_Element_Analysis_in_Dentistry
104. Falcinelli C, Valente F, Vasta M, Traini T. Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dent Mater.* 2023;39(6):539–56.
105. Knop L, Gandini LG, Shintcovsk RL, Gandini MREAS. Scientific use of the finite element method in Orthodontics. *Dent Press J Orthod.* 2015;20(2):119–25.
106. Chien PY, Walsh LJ, Peters OA. The extended finite element method in endodontics: A scoping review and future directions for cyclic fatigue testing of nickel–titanium instruments. *Clin Exp Dent Res.* 2024;10(3):e893.
107. Sengul F, Gurbuz T, Sengul S. Finite element analysis of different restorative materials in primary teeth restorations. *Eur J Paediatr Dent.* 2014;15(3):317-22.
108. Piccioni MARV, Campos EA, Saad JRC, Andrade MF de, Galvão MR, Rached AA. Application of the finite element method in Dentistry. *RSBO Online* [Internet]. 2013 [cited 2024 May 25];10(4):170–7. Available from: http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-56852013000400011

109. Lisiak-Myszke M, Marciniak D, Bieliński M, Sobczak H, Garbacewicz Ł, Drogoszewska B. Application of Finite Element Analysis in Oral and Maxillofacial Surgery—A Literature Review. *Materials*. 2020;13(14):3063.
110. Oskui IZ, Hashemi A, Jafarzadeh H, Kato A. Finite element investigation of human maxillary incisor under traumatic loading: Static vs dynamic analysis. *Comput Methods Programs Biomed*. 2018;155:121-5.
111. Jayasudha K, Hemanth M, Baswa R, Raghuveer HP, Vedavathi B, Hegde C. Traumatic impact loading on human maxillary incisor: A Dynamic finite element analysis. *J Indian Soc Pedod Prev Dent*. 2015;33(4):302-6.
112. Brkić H, Dumančić J, Vodanović M. *Biologija i morfologija ljudskih zuba Zagreb: Naklada Slap*; 2016. p. 61.
113. Ruse ND. Propagation of erroneous data for the modulus of elasticity of periodontal ligament and gutta percha in FEM/FEA papers: a story of broken links. *Dent Mater*. 2008;24(12):1717–9.
114. Ausiello P, Dal Piva A, Borges A, Lanzotti A, Zamparini F, Epifania E, et al. Effect of Shrinking and No Shrinking Dentine and Enamel Replacing Materials in Posterior Restoration: A 3D-FEA Study. *Appl Sci*. 2021;11:11052215.
115. Matuda AGN, Silveira MPM, Andrade GS de, Piva AM de OD, Tribst JPM, Borges ALS, et al. Computer Aided Design Modelling and Finite Element Analysis of Premolar Proximal Cavities Restored with Resin Composites. *Mater Basel Switz*. 2021;14(9):2366.
116. Aggarwal S, Garg V. Finite element analysis of stress concentration in three popular brands of fiber posts systems used for maxillary central incisor teeth. *J Conserv Dent JCD*. 2011;14(3):293-6.
117. Diana HH, Oliveira JS, Ferro MC de L, Silva-Sousa YTC, Gomes ÉA. Stress Distribution in Roots Restored with Fiber Posts and An Experimental Dentin Post: 3D-FEA. *Braz Dent J*. 2016;27(2):223-7.

118. Kedia S, Narayana I, Shetty RV, Shukla E, Kalasaiah D. Stress Distribution in Teeth Restored with Different Posts Using Single or Multi-post Technique: A Three-dimensional Finite Element Analysis. *Cons Dent Endod J.* 2022;7(1):1-6.
119. Richert R, Robinson P, Viguie G, Farges JC, Ducret M. Multi-Fiber-Reinforced Composites for the Coronoradicular Reconstruction of Premolar Teeth: A Finite Element Analysis. *BioMed Res Int.* 2018;2018:4302607.
120. 3M RelyX Fiber Post 3D Glass Fiber Post: Technical Data Sheet [Internet]. 2014 [cited 2024 May 28]; [about 11 p.]. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://multimedia.3m.com/mws/media/11465200/3m-relyx-fiber-post-3d-glass-fiber-post-technical-data-sheet.pdf>
121. GC Fiber Post - IFU [Internet].2014 [cited 2024 May 28]. Available from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gc.dental/america/sites/america.gc.dental/files/products/downloads/gcfiberpost/ifu/gc-fiber-post-ifu.pdf>
122. Dentsply Maillefer Product Catalogue [Internet]. 2014 [cited 2024 May 28]; [about 67 p.]. Available from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://domdent.hu/wp-content/uploads/2023/10/DENTSPLY_MAILLEFER_2014_Product_Catalogue_Single_Page_HR_0714_EN.pdf
123. Talati A, Disfani R, Afshar A, Fallah Rastegar A. Finite element evaluation of stress distribution in mature and immature teeth. *Iran Endod J.* 2007;2(2):47-53.
124. Khadar S, Sapkale K, Patil PG, Abrar S, Ramugade M, Huda F. Fracture Resistance and Stress Distribution Pattern of Different Posts-Core Systems in Immature Teeth: An In Vitro Study and 3D Finite Element Analysis. *Int J Dent.* 2022;2022:2610812.
125. Anthrayose P, Nawal RR, Yadav S, Talwar S, Yadav S. Effect of revascularisation and apexification procedures on biomechanical behaviour of immature maxillary central incisor teeth: a three-dimensional finite element analysis study. *Clin Oral Investig.* 2021;25(12):6671-9.

126. Dezzen-Gomide AC, de Carvalho MA, Lazari-Carvalho PC, de Oliveira HF, Cury AADB, Yamamoto-Silva FP, et al. A three-dimensional finite element analysis of permanent maxillary central incisors in different stages of root development and trauma settings. *Comput Methods Programs Biomed.* 2021;207:106195.
127. Bucchi C, Marcé-Nogué J, Galler KM, Widbiller M. Biomechanical performance of an immature maxillary central incisor after revitalization: a finite element analysis. *Int Endod J.* 2019;52(10):1508-18.
128. Eram A, Zuber M, Keni LG, Kalburgi S, Naik R, Bhandary S, et al. Finite element analysis of immature teeth filled with MTA, Biodentine and Bioaggregate. *Comput Methods Programs Biomed.* 2020;190:105356.
129. Mazzotta L, Cozzani M, Razionale A, Mutinelli S, Castaldo A, Silvestrini-Biavati A. From 2D to 3D: Construction of a 3D Parametric Model for Detection of Dental Roots Shape and Position from a Panoramic Radiograph—A Preliminary Report. *Int J Dent.* 2013;2013:964631.
130. Hassouneh L, Matoug-Elwerfelli M, Al-Omari T, Setzer FC, Nagendrababu V. Assessment of biomechanical behavior of immature non-vital incisors with various treatment modalities by means of three-dimensional quasi-static finite element analysis. *Sci Rep.* 2023;13:17491.
131. Bacchi A, Caldas RA, Schmidt D, Detoni M, Matheus Albino Souza null, Cecchin D, et al. Fracture Strength and Stress Distribution in Premolars Restored with Cast Post-and-Cores or Glass-Fiber Posts Considering the Influence of Ferrule. *BioMed Res Int.* 2019;2019:2196519.
132. Verri FR, Okumura MHT, Lemos CAA, Almeida DAF, de Souza Batista VE, Cruz RS, Oliveira HFF, Pellizzer EP. Three-dimensional finite element analysis of glass fiber and cast metal posts with different alloys for reconstruction of teeth without ferrule. *J Med Eng Technol.* 2017;41(8):644-51.

133. Nokar S, Bahrami M, Mostafavi AS. Comparative Evaluation of the Effect of Different Post and Core Materials on Stress Distribution in Radicular Dentin by Three-Dimensional Finite Element Analysis. *J Dent Tehran Iran*. 2018;15(2):69-78.
134. Okamoto K, Ino T, Iwase N, Shimizu E, Suzuki M, Satoh G, et al. Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in composite resin cores with fiber posts of varying diameters. *Dent Mater J*. 2008;27(1):49-55.
135. Gurbuz T, Sengul F, Altun C. Finite element stress analysis of short-post core and over restorations prepared with different restorative materials. *Dent Mater J*. 2008;27(4):499–507.
136. Kumar P, Rao RN. Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in a tooth restored with metal and fiber posts of varying diameters: An in-vitro study. *J Conserv Dent JCD*. 2015;18(2):100-4.
137. Li Q, Yan P, Chen Z. Fracture resistance and failure patterns of open apex root teeth with different posts after endodontic treatment. *J Huazhong Univ Sci Technol Med Sci*. 2011;31(2):271.
138. Badami V, Ketineni H, Akarapu S, Mittapalli SP, Khan A. Comparative Evaluation of Different Post Materials on Stress Distribution in Endodontically Treated Teeth Using the Finite Element Analysis Method: A Systematic Review. *Cureus*. 2022;14(9):e29753.
139. Gomes EA, Diana HH, Oliveira JS, Silva-Sousa YTC, Faria ACL, Ribeiro RF. Reliability of FEA on the Results of Mechanical Properties of Materials. *Braz Dent J*. 2015;26(6):667-70.

8. ŽIVOTOPIS

Petra Bučević Sojčić rođena je 9. siječnja 1985. godine u Zagrebu. Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu upisuje akademske godine 2003./2004. gdje diplomira u rujnu 2009. godine te se svrstava među 10% najuspješnijih studenata. Za vrijeme studija demonstrator je na Zavodu za Fiziologiju u akademskim godinama 2006./2007. te 2007./2008. Pripravnički staž odrađuje u Domu zdravlja Zagreb – Istok od 2010. do 2011. godine pod mentorstvom dr. Jesenke Jeličić gdje nakon polaganja stručnog ispita volontira još godinu dana. U periodu od 2012. do 2016. godine radno iskustvo stječe na zamjenama u raznim ordinacijama Domova zdravlja te privatnim ordinacijama dentalne medicine u Zagrebu. 2014. godine brani magistarski rad *Molarnoincizivna hipomineralizacija: etiologija, dijagnostika i terapija* pod mentorstvom prof. Ivane Čuković Bagić. Godine 2015. jedna je od članica Radne skupine za preventivu i promicanje zaštite oralnog zdravlja pri Nacionalnom povjerenstvu za djelatnost dentalne medicine Ministarstva zdravlja Republike Hrvatske. Specijalizaciju iz dječje stomatologije započinje 2016. godine pod mentorstvom prof. Hrvoja Jurića te istovremeno upisuje Poslijediplomski doktorski studij Dentalna medicina na Stomatološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Od 2018. do 2022. godine suradnica je na projektu Hrvatske zaklade za znanost *Istraživanje i razvoj novih mikro i nanostrukturnih bioaktivnih materijala u dentalnoj medicini* voditeljice prof. dr. sc. Ivane Miletić. Specijalistički ispit iz dječje i preventivne stomatologije polaže u travnju 2019. godine. Od 2022. godine zaposlena je kao asistent u nastavi na Stomatološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za dječju i preventivnu stomatologiju. Članica je Hrvatskog društva za dječju i preventivnu stomatologiju HLZ-a. Udana i majka dvoje djece.

Popis objavljenih radova i sažetaka na zbornicima skupova

Radovi u indeksiranim časopisima CC, SCI, SSCI:

1. Petrović D, Cicvarić O, Šimunović-Erpušina M, Ivančić Jokić N, Bakarčić D, **Bučević Sojčić P**, Jurić H. The Role of Family Factors in the Development of Dental Anxiety in Children. *Medicina*, 2024;60(1):180. doi: 10.3390/medicina60010180.
Index/JCR kvartil u godini objave rada: Q3

2. Roša J, Baraba A, **Bučević P**, Dordijevski D, Antolković I, Rosa J. Substituting dietary polyunsaturated fat with monounsaturated fat increases insulin sensitivity in cultured rat hepatocytes. Coll Antropol. 2008;32(1):119-23.
Index/JCR kvartil u godini objave rada: Q2

Radovi objavljeni u časopisima indeksiranim u WOS – ESCIE:

1. **Bučević Sojčić P**, Leder Horina J, Jurčević Lulić T, Bočkaj N, Jurić H. Measurement of the Dentin Wall Thickness of the Maxillary Central Incisor in Relation to the Stage of Root Development - a Pilot Study. Acta stomatol Croat. 2023; 57(3) 3: 206-15. doi: 10.15644/asc57/3/1 - **rad proizašao iz disertacije**
2. Turjanski S, Musić L, Špiljak B, **Bučević Sojčić P**, Karlović Z, Zajc I. Analysis of Hospital-Based Dental Procedures Under General Anesthesia in Uncooperative Patients: a Retrospective Study. Acta stomatol Croat. 2023; 57(1):22-31. doi:10.15644/asc57/1/3

Objavljeni sažeci na zbornicima skupova:

1. Peručić J, Mužinić K, **Bučević Sojčić P**, Jurić H. Revascularization procedure on the lower central incisor after unsuccessful endodontic treatment - case report. Congress "Current Practice in Croatian Pediatric Dentistry – 2023 // Acta Stomatologica Croatica / Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2024. str. 308-308 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
2. **Bučević Sojčić P**, Turjanski S, Mužinić K, Pandurić V, Jurić H. Management of molar incisor hypomineralisation on severly affected incisors – a case report. Congress "Current Practice in Croatian Pediatric Dentistry – 2023 // Acta Stomatologica Croatica / Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2024. str. 307-307 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
3. **Bučević Sojčić P**, Jurić H. Special features of radiologic analysis in external resorption. Congress "Current Practice in Croatian Pediatric Dentistry – 2023 // Acta Stomatologica Croatica / Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2024. str. 307-307 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).
4. **Bučević Sojčić P**, Turjanski S, Šimunović L, Zajc I. Autogenous molar transplantation: a case report. Congress "Current Practice in Croatian Pediatric Dentistry – 2022". //Acta stomatologica Croatica/ Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2023. str. 89-89 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

5. **Bučević Sojčić P**, Leder Horina J, Par Matej, Jurić H. Mjerenje debljine dentinskog zida kod gornjega središnjega sjekutića u ovisnosti o razvojnem stupnju korijena. // Acta Stomatologica Croatica / Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2021. str. 112-112. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
6. **Bučević Sojčić P**, Leder Horina J, Jurić H. Odgovor gornjega središnjega sjekutića na opterećenje u ovisnosti o razvojnem stupnju korijena // Acta Stomatologica Croatica / Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2020. str. 109-109 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
7. **Bučević Sojčić P**, Jurić H. Revaskularizacija na mladim trajnim sjekutićima: prikaz slučaja // Acta Stomatologica Croatica/ Brkić, Hrvoje (ur.). Zagreb, 2018. str. 78-78 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
8. Negovetić Vranić D, Urlić I, Jeličić J, **Bučević P**, Čuković-Bagić I. Measuring the influence of telescopic Galileo system on visual acuity of paediatric dentists in a simulated clinical environment. // 13th Congress of the European Academy of Paediatric Dentistry, 2016 ; Abstract Book Beograd, Srbija, 2016. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, ostalo)
9. Roša J, Đorđijevski D, **Bučević P**, Roša, J. Vanadate modulate hepatic insulin resistance in cultured hepatocytes isolated from rats on high-fat diets (saturated and unsaturated fat) // Abstracts of the 2nd International Congress on "Prediabetes" and the Metabolic Syndrome ; u: Diabetes & vascular Disease Research 4 (2007) (S1) / Grant, Peter J. ; Bailey, Clifford J. ; Marso, Steven P. ; Marx, Nikolaus (ur.).Barcelona: Sherbone Gibbs Limited, 2007. str. S196-S196 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Radovi objavljeni u časopisima koji nisu indeksirani:

1. **Bučević P**. Uloga dentalnog asistenta u očuvanju oralnog zdravlja djece // Dentalni asistent, (2016), 2; 12-13 (domaća recenzija, članak, stručni)

Poglavlje u knjizi:

1. **Bučević Sojčić P**, Pavelić B, Jurić H. Terapijski postupak revaskularizacije. In: Vulićević ZR, Radović I (editors). Endodontska terapija mladih stalnih zuba. 1. izd. Beograd: Stomatološki fakultet, Univerzitet u Beogradu; 2019. p. 156-64.