

Porównanie zastosowania micro- CT i CBCT w przygotowaniu zębów do roli próbek w badaniach in vitro

Comparison of the use of micro-CT and CBCT in the preparation of teeth for the role of samples in in vitro research

STRESZCZENIE

Wstęp: Grubość zębiny stanowi ważny czynnik wpływający na wyniki otrzymywane w badaniach eksperymentalnych. Odpowiednio precyzyjna i powtarzalna metoda jego pomiaru ma kluczowe znaczenie w zapewnieniu rzetelności i wiarygodności pracy badawczej.

Cel: Celem niniejszego badania było porównanie zastosowania tomografii komputerowej wiązką stożkową i mikrotomografii w przygotowaniu zębów do roli próbek w badaniach medycznych.

Materiał i metody: Spośród 100 usuniętych zębów wyselekcjonowano 4 o odpowiednich cechach budowy potwierdzonych na obrazach pochodzących z CBCT. Zostały one zatopione w masie silikonowej i przecięte w płaszczyźnie horzontalnej w taki sposób, by płaszczyzna przecięcia była równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez szczyty rogów miazgi. Następnie próbki zostały poddane badaniom tomografii komputerowej wiązką stożkową oraz mikrotomografii. Dwóch autorów niezależnie wykonywało pomiary odległości pomiędzy płaszczyzną przecięcia a szczytami rogów miazgi na otrzymanych przekrojach czołowych i strzałkowych. Otrzymane wartości pomiarów zostały opracowane statystycznie.

Wyniki: Wartości pomiarów wykonywanych na przekrojach CBCT były większe niż wartości uzyskane z pomiarów wykonywanych w micro- CT. W przypadku dwóch z czterech próbek uzyskano istotne statystycznie różnice w wartościach pomiarów.

Wnioski: Badanie CBCT nie jest wystarczającym narzędziem w precyzyjnym przygotowaniu zębów do roli próbek badawczych.

SUMMARY

Introduction: The thickness of dentine is an important factor affecting the results of the experimental studies. An adequately precise and repeatable method of its measurement is of key importance in ensuring the reliability and credibility of the research work.

Aim: The aim of this study was to compare the use of conical beam computed tomography and microtomography during preparation of teeth for samples in medical research.

Material and methods: From among 100 extracted teeth, 4 were selected with appropriate structural features confirmed in the CBCT images. They were embedded in the silicone mass and cut in a horizontal plane in such a way that the intersection plane was parallel to the plane defined by the pulp horns. Then the samples were subjected to conical beam

computed tomography and microtomography. Two authors independently measured the distance between the plane of intersection and the pulp horns on the obtained frontal and sagittal sections. The measurement data values were statistically processed.

Results: The outcomes of the measurements of CBCT slices were greater than the ones of micro-CT. In the case of two of four samples, statistically significant differences occurred.

Conclusions: CBCT examination is an insufficient tool for precise preparation of teeth for the role of research samples.

WSTĘP

Zęby usunięte są często stosowanym materiałem w badaniach in vitro. Po odpowiednim przygotowaniu mogą bardzo wiarygodnie symulować warunki występujące w czasie opracowywania i wypełniania ubytków w praktyce klinicznej. Stosując zęby usunięte w badaniach konieczne jest odpowiednio precyzyjne i powtarzalne przygotowanie próbek. (1) Szczególnie istotne dla wyników prowadzonych badań jest uzyskanie określonej i powtarzalnej dla wszystkich próbek grubości zębiny. Czynniki takie jak przewodność temperatury, czy przepuszczalność dla substancji chemicznych są bezpośrednio powiązane z grubością izolującej warstwy zębiny. Jest ona jednym z najważniejszych czynników które wpływają na zachowanie żywotności miazgi zęba podczas opracowania i wypełniania ubytków. (2)

W dostępnych publikacjach najczęściej badacze podają głębokość preparacji danego ubytku. Takie postępowanie nie pozwala na dokładne określenie grubości zębiny pomiędzy powierzchnią dna ubytku a komorą miazgi. Złotym standardem pomiarów w badaniach naukowych jest analiza zdjęć mikroskopowych. Niestety metody tej nie można wykorzystać w przygotowaniu próbek, gdyż wiąże się ona ze zniszczeniem badanych obiektów. W literaturze można znaleźć kilka nieinwazyjnych metod pozwalających na określenie grubości pozostałej zębiny. Najbardziej rozpowszechnione i najczęściej używane są metody oparte na wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego. Zdjęcie zębowe, będące najprostszym narzędziem służącym obrazowaniu tkanek zmineralizowanych zęba może być zawodne, gdyż będąc zdjęciem sumacyjnym, daje nakładanie się obrazu wszystkich struktur na przebiegu promienia w tym rogów miazgi. Zdecydowanie większe możliwości w tym zakresie oferuje badanie CBCT (tomografia komputerowa wiązką stożkową). Po rekonstrukcji daje ona obraz w trzech wymiarach przestrzennych. Ograniczeniem tego narzędzia jest jednak relatywnie niska rozdzielczość. Obecnie duże nadzieje pokładane są w micro-CT (mikrotomografia rentgenowska). Narzędzie to z powodzeniem wykorzystywane jest w licznych badaniach naukowych i pozwala na precyzję pomiarów porównywalną z mikroskopem stereoskopowym. (3) Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie czy CBCT spełnia kryteria wymaganej jakości obrazowania dla uzyskania dokładnego pomiaru grubości pozostałej zębiny w czasie przygotowywania próbek do badań naukowych.

MATERIAŁ I METODY

W ciągu dwóch miesięcy zebrano łącznie 100 zębów trzecich trzonowych usuniętych z przyczyn periodontologicznych, ortodontycznych i chirurgicznych. Zęby były przechowywane w 1 % roztworze tymolu przez 1 miesiąc w temperaturze pokojowej. Spośród wszystkich zębów wyselekcjonowano 15, które były wolne od próchnicy i wad rozwojowych szkliwa. Wybrane zęby zostały oczyszczone z resztek tkanek miękkich przy pomocy 2% roztworu podchlorynu sodu oraz skalera piezoelektrycznego (Woodpecker, Chiny), po czym starannie je wypolerowano przy pomocy zawiesziny pumeksu i szczotki osadzonej w kątnicy.

Następnie korzenie wyselekcjonowanych zębów zostały całkowicie zatopione w masie silikonowej (3M Express XT Putty Soft, USA) do wysokości połączenia szklivno-cementowego. Na bloczku silikonowym oznaczono rzędy za pomocą liter alfabetu łacińskiego (A-D), zaś kolumny za pomocą cyfr arabskich (1-4) (ryc.1.). Gotowy bloczek silikonowy poddano badaniu tomografii komputerowej wiązką stożkową (Vatech Pax-i 3D, Korea Południowa). Wstępne badanie CBCT miało na celu wyselekcjonowanie zębów o określonej budowie anatomicznej, umożliwiającą takie ustawienie płaszczyzny horyzontalnej w czasie analizowania badania, by przechodziła ona przez szczyty dokładnie trzech wybranych guzków. Po ustaleniu takiej płaszczyzny przesuwano ją równolegle dowierzchołkowo aż do uwidocznienia rogów miazgi. Wybierano tylko te zęby w których płaszczyzna przechodząca przez szczyty wybranych guzków była równoległa do płaszczyzny przechodzącej przez szczyty wszystkich rogów miazgi. Na podstawie analizy obrazów CBCT wyselekcjonowano 4 zęby spełniające powyższe założenia. Zależności przestrzenne przedstawiono na rycinie 2.

Wybrane zęby zostały wyjęte z materiału silikonowego. Zidentyfikowano guzki wyznaczające płaszczyznę horyzontalną (linia niebieska na rycinie 2). Następnie każdy ząb umieszczono na płaskiej powierzchni płytki szklanej, w taki sposób, by oznaczone guzki kontaktowały się z jej powierzchnią. Wykonano indywidualne indeksy z masy silikonowej (3M Express XT Putty Soft, USA) w określonym uprzednio położeniu przestrzennym. Płaska powierzchnia indeksu była tożsama z płaszczyzną wyznaczoną przez szczyty guzków oraz równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez szczyty rogów miazgi.

Na obrazach pochodzących z CBCT zmierzono odległość między płaszczyzną wyznaczoną przez szczyty rogów miazgi a płaszczyzną wyznaczoną przez szczyty wybranych guzków

(linia niebieska i zielona na rycinie 2.). Następnie wyznaczono w każdym zębie dodatkową płaszczyznę 2 mm powyżej szczytów rogów miazgi (linia czerwona na rycinie 2), po czym zmierzono odległość pomiędzy uzyskaną w ten sposób płaszczyzną a płaszczyzną przechodzącą przez szczyty wybranych guzków. Indeksy silikonowe zostały docięte przy pomocy skalpela nr 11 (SwannMorton, Anglia) po odmierzeniu za pomocą suwmiarki (Magtoto, Chiny) wyznaczonej wcześniej odległości) od płaskiej powierzchni indywidualnego indeksu silikonowego do wyznaczonej uprzednio dodatkowej płaszczyzny. Poprzez docięcie indeksów odsłonięto część korony klinicznej zęba (Ryc.3). Została ona usunięta przy pomocy wiertła diamentowych (MDT, Izrael) na wiertarce turbinowej (W&H, Austria) w taki sposób by uzyskać płaską powierzchnię. Powierzchnia została następnie wygładzona za pomocą krążków abrazyjnych Sof-Lex. (3M ESPE, USA) (Ryc.4). Odległość pomiędzy szczytami rogów miazgi, a powierzchnią przecięcia próbek powinna wynosić około 2 mm.

Tak przygotowane zęby umieszczono na płytce szklanej i wykonano końcowe CBCT przeznaczone do pomiarów. Pomiary zostały wykonane przy pomocy oprogramowania służącego do przeglądania obrazów radiologicznych RadiAnt Viewer (Medixant, Polska) niezależnie przez 2 autorów. Pomiar wykonywano od uprzednio przygotowanej płaskiej powierzchni prostopadle do rogu miazgi, w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej. Pomocniczo w programie Ez 3D plus (Vatech PaX-i 3D, Korea Południowa) przeprowadzono renderowanie objętościowe z oknem kostnym i rekonstrukcję obrazów 3D, by lepiej zobrazować zależności przestrzenne topografii komory zęba. Obrazy te nie zostały użyte do wykonania pomiarów. Uzyskane obrazy ukazują ryciny 5 i 6. W kolejnym etapie próbki zostały poddane badaniu mikrotomografii (SkyScan, Belgia). Odległości zostały zmierzone w analogiczny sposób i przez tych samych autorów, prowadzących pomiary wykonywane w oparciu o obrazy CBCT.

Zgodność pomiarów przeprowadzonych przez autorów została sprawdzona poprzez obliczenie współczynnika korelacji wewnątrzklasowej (ang. ICC - intraclass correlation coefficient), obliczonego osobno dla grupy pomiarów pochodzących z CBCT oraz pochodzących z micro-CT. Obliczono średnie wartości pomiarów i odchylenia standardowe dla każdej próbki. W programie Microsoft Excel (Microsoft, USA) wykonano analizę statystyczną otrzymanych wyników, obliczając przy pomocy testu T-studenta istotność statystyczną wyników oraz stosując d Cohena obliczono wielkość efektu.

WYNIKI

Współczynnik korelacji wewnątrzklasowej wynosił zarówno w grupie CBCT jak i w grupie micro-CT 0,97 co odpowiada wysokiej zgodności pomiarów między autorami. Uzyskane średnie wartości pomiarów wraz z odchyleniami standardowymi zostały przedstawione w tabeli 1. Największą wartość średniej grubości pozostałej zębiny uzyskano w próbce nr 3 zarówno w wynikach badania CBCT jak i micro-CT. Najmniejsze wartości zostały uzyskane po analizie

obydwu badań w próbce nr 2. Duże istotne statystycznie różnice pomiędzy wartościami pomiarów zostały uzyskane w przypadku zębów nr 1 i 3. W przypadku każdego zęba średnia wartości pomiarów osiągnięta w badaniu CBCT okazywała się wyższa niż w badaniu mikrotomograficznym.

DYSKUSJA

Tomografia komputerowa wiązką stożkową jest powszechnie stosowanym narzędziem w diagnostyce klinicznej. Wiązka promieniowania w kształcie stożka, emitowana z ruchomego źródła poruszającego się wokół badanego obiektu pozwala na uzyskanie trójwymiarowego obrazu badanych struktur, przy użyciu mniejszej dawki promieniowania w porównaniu do klasycznej tomografii komputerowej. Mikrotomografia rentgenowska nie jest wykorzystywana klinicznie, lecz służy do obrazowania trójwymiarowego struktur mikroskopowych nieprzepuszczalnych dla promieniowania. Pozwala na obrazowanie dróg neuronalnych, oraz morfologii tkanek, w tym zębów. W przeciwieństwie do obrazów pochodzących z mikroskopu świetlnego daje ona obraz trójwymiarowy. W stomatologii technologia ta wykorzystywana jest przede wszystkim w badaniach z zakresu endodoncji, gdzie precyzja obrazowania umożliwia ocenę morfologii oraz zakres opracowania i precyzję wypełnienia systemu kanałowego.(4, 5)

Zastosowanie badania mikrotomograficznego umożliwia przeprowadzenie o wiele bardziej dokładnych pomiarów grubości zębiny niż badanie CBCT. Rozdzielczość badania CBCT stosowanego w naszym eksperymencie wynosi 248 μm , podczas gdy rozdzielczość uzyskana na obrazach mikro-CT wynosi 37 μm . Zatem obrazy pochodzące z micro-CT są około 6,7-razy bardziej dokładne w porównaniu do obrazów CBCT. Badanie CBCT z powodu ograniczonej rozdzielczości nie pozwala na precyzyjne lokalizowanie rogów miazgi, podczas gdy wysoka rozdzielczość mikro-CT zapewnia bardzo dokładne odwzorowanie topografii tkanek zęba. Porównanie średnich pomiarów odległości między płaszczyzną przecięcia a rogiem miazgi pokazuje jednoznacznie, że wartości mierzone na obrazach uzyskanych z CBCT są większe od wartości mierzonych na obrazach z micro-CT. Przyczyny należy upatrywać w tym, że badanie mikrotomograficzne wykryło z dużą dokładnością szczyty rogów miazgi, które w badaniu CBCT były niewidoczne, gdyż znajdowały się pomiędzy rejestrowanymi obrazami kolejnych warstw. Pomiary wykonywane na obrazach pochodzących z CBCT nie pokazywały rzeczywistej odległości od szczytów rogów miazgi, lecz odległość ukazaną na przekroju, który mógł nie zawierać punktu będącego najbliższej płaszczyzny przecięcia. W badaniu mikro-CT odległość pomiędzy poszczególnymi przekrojami była ponad 6-krotnie mniejsza, co powodowało lepszą wykrywalność punktów najbliższych płaszczyźnie przecięcia. Konsekwencją są mniejsze wartości średniej pomiarów. Ponadto ostrość obrazu w CBCT jest mniejsza niż w micro-CT. Badanie mikrotomograficzne pozwala na precyzyjny pomiar, podczas gdy tomografia komputerowa wiązką

stożkową daje obrazy o rozmytych nieostrych krawędziach, co pokazano na rycinach 7a i 7b. Duży rozmiar woksela w CBCT sprawił, że szczyty rogów miążgi były obrazowane podobnie do zębiny, co spowodowało zawyżenie rejestrowanych wartości. Pomiary wykonywane w oparciu o obrazy badania CBCT nie mogą być zatem uznane za precyzyjne, z uwagi na rozmycie brzegów implikujące mniejszą wiarygodność przeprowadzonego pomiaru.

W badaniach naukowych dokładność i precyzja rejestrowanych parametrów ma kluczowe znaczenie. Wartości uzyskiwane w wyniku pomiarów pochodzących z CBCT w przypadku próbek 1 i 3 są istotnie większe niż wartości uzyskiwane w pomiarach z mikro-CT. Wykorzystanie w eksperymencie naukowym zębów przygotowanych tylko w oparciu o badanie CBCT może istotnie wpłynąć na zafałszowanie wyników. Brak precyzji w ustalaniu grubości pozostałej zębiny w istotny sposób utrudnia porównywanie wyników poszczególnych badań ze sobą, a także może prowadzić do wyciągania błędnych wniosków z przeprowadzonych doświadczeń. Jest to szczególnie ważne w badaniach dotyczących przewodnictwa temperatury, czy przepuszczalności zębiny.

Wyniki naszego badania są zgodne z wynikami przedstawionymi przez Mangione i wsp.(6). Ich zespół stosując obrazy pochodzące z mikro-CT i CBCT wykonywał pomiary szerokości śrubowych wszczepów śródkostnych zaimplantowanych w kości świńskiej. Pomiary wykonane na obrazach pochodzących z CBCT wskutek niskiej ostrości obrazowania i artefaktów dały większe wartości w porównaniu do pomiarów pochodzących z mikro-CT. Różnice pomiędzy wartościami pomiarów w większości przypadków były istotne statystycznie. Do podobnych wniosków doszedł zespół Tayman'a i wsp.(7). Mierzili oni ubytki kostne wywołane chorobami przyzębia na obrazach CBCT i mikro-CT. Stwierdzili, że pomiary ubytków kostnych wykonywane na obrazach pochodzących z mikro-CT dały istotne statystycznie wyższe wartości w porównaniu do pomiarów wykonywane przy pomocy CBCT. Przyczynę autorzy upatrują w niskiej ostrości obrazowania brzegów kości na CBCT, co mogło sugerować mniejszą rozległość ubytku. Inne badanie przeprowadzone przez Ferrare i wsp. ukazało zaś, że wielkość bloków kostnych jest niedoszacowana na obrazach CBCT w porównaniu do mikro-CT, co autorzy tłumaczą niską rozdzielczością i rozmyciem brzegów obrazowanych próbek. Otrzymane wartości nie były jednak istotne statystycznie.(8)

Alternatywą dla pomiarów radiologicznych wykorzystywanych przez nasz zespół są pomiary fotograficzne. W środowisku naukowym pomiary na fotografiach wykonanych w mikroskopie są uważane za złoty standard postępowania w mierzeniu małych obiektów. Wykonanie pomiarów grubości zębiny w mikroskopie świetlnym wymaga jednak zniszczenia próbki poddawanej obserwacji, w związku z czym nie można wykorzystać tej metody w przygotowaniu materiału badawczego. Jak donosi Demirel i wsp.(9),

pomiary radiologiczne mają mniejsze niż fotograficzne odchylenie standardowe, średnią i medianę. W ocenie autorów wspomnianego opracowania, jest to skutkiem błędnej lokalizacji punktów pomiarowych w analizowanych obrazach radiologicznych. Przyczyną jest mniejsza mineralizacja niektórych obszarów zęba, szczególnie w przypadku pomiarów przeprowadzanych w zębach dotkniętych próchnicą. Słabo zmineralizowane, bądź zdeminalizowane obszary na obrazach radiologicznych dają obraz słabego zacielenia, co może generować błędy w pomiarach. Kolejnym ograniczeniem obrazów radiologicznych jest niewystarczająca ostrość. O ile przy badaniach CBCT może to być istotny problem, to zastosowanie mikro-CT zapewnia właściwą jakość obrazowania. Porównania CBCT, mikro-CT i pomiarów w mikroskopii SEM podjął się Caspar i wsp.(3). Ich zespół badał mikropęknięcia korzenia spowodowane opracowywaniem kanałów korzeniowych. Zaprezentowane przez nich wyniki jednoznacznie pokazują, że badanie CBCT nie jest w stanie wykrywać mikropęknięć, podczas gdy badanie mikro-CT ukazuje ich obecność. Najwięcej mikropęknięć wykryto za pomocą analizy obrazów pochodzących z SEM.

Kolejną metodą pomiaru grubości zębiny jest zastosowanie optycznej tomografii koherencyjnej (OCT). Jest to narzędzie które za pomocą wiązki światła pozwala na uzyskanie obrazów podobnych do skanu. Wykorzystywana jest obecnie w okulistyce. Według doniesień metoda ta dorównuje precyzją mikrotomografii. (10) OCT jest nieinwazyjnym narzędziem, działającym wysoce precyzyjnie przy grubości warstwy zębiny wielkości maksymalnie 1 mm. W stomatologii nie jest stosowana powszechnie z powodu trudności w określeniu wartości współczynnika refrakcji. Zależnie od liczby i przebiegu kanalików zębiny, stopnia zmineralizowania tkanki, sklerotyzacji i jej nawodnienia wartości współczynnika refrakcji wynoszą między 1,43, a 1,57. Krause i wsp. w swoich próbach przyjęli uśredniony współczynnik refrakcji na poziomie 1,55, co zapewne tłumaczy znaczne rozbieżności wyników uzyskanych przy pomocy mikroskopu świetlnego i metody optycznej tomografii koherencyjnej. Badania Majkut i wsp. pokazały jednak, że istnieje silna korelacja pomiędzy wartościami grubości zębiny zmierzonej na obrazach mikro-CT i OCT, pomimo większego rozmycia brzegów na obrazach z OCT. (11, 12).

Inną często stosowaną przez badaczy metodą jest pomiar grubości pozostałej zębiny przy pomocy mikrometru. Badanie polega na wprowadzeniu jednego ramienia urządzenia do komory zęba, podczas gdy drugie ramię znajduje się w ubytku.(13) Zasadniczym problemem tej metody jest niskie prawdopodobieństwo znalezienia rogów miążgi w które można wprowadzić ramię mikrometru. Opiera się ono najczęściej o sklepienie komory, nie wnikać do szczytów rogów miążgi, co fałszuje wartość pomiaru.. Wykorzystanie takiego sposobu pomiaru może wywołać bardzo duże fluktuacje wyników z uwagi

na różnicę pomiędzy zmierzoną a realną wartością grubości, co utrudnia późniejsze porównywanie wyników badań. Kolejnym mankamentem jest konieczność szerokiego opracowania kanałów korzeniowych a często również furkacji zębów wielokorzeniowych. Rozwiązaniem tego problemu jest opracowanie narzędziami wnętrza komory miazgi, tak aby nadać jej sklepieniu kształt płaski, lub wycinanie dysków zębinowych o określonej grubości(2). Taki sposób preparacji próbek jest bardzo precyzyjny i charakteryzuje się wysoką powtarzalnością, jednakże z powodu swojej inwazyjności doprowadza do zatracenia trójwymiarowej struktury komory zęba, wraz z jej wszystkimi właściwościami.

WNIOSKI

Porównanie pomiarów uzyskanych za pomocą CBCT z pomiarami pochodzącymi z micro-CT pokazało, że w przypadku dwóch z czterech próbek istnieją duże istotne statystycznie różnice w zmierzonych wartościach. We wszystkich próbkach średnie wartości pomiarów uzyskanych z CBCT były większe niż wartości pochodzące z micro-CT. Badanie sugeruje, że CBCT nie jest wystarczającym narzędziem do uzyskania pewnego i precyzyjnego pomiaru odległości pomiędzy szczytem rogu miazgi a dnem ubytku. W przygotowaniu zębów do roli próbek badawczych korzystniejszym wyborem jest wykonywanie pomiarów na obrazach uzyskiwanych w badaniu micro-CT.

PIŚMIENICTWO:

1. Fernandez-Estevan L, Millan-Martinez D, Fons-Font A, Agustin-Panadero R, Roman- Rodriguez JL. Methodology in specimen fabrication for in vitro dental studies: Standardization of extracted tooth preparation. *J Clin Exp Dent.* 2017;9(7):e897-e900.
2. Yasa E, Atalayin C, Karacolak G, Sari T, Turkun LS. Intrapulpal temperature changes during curing of different bulk-fill restorative materials. *Dent Mater J.* 2017;36(5):566-72.
3. Capar ID, Gok T, Uysal B, Keles A. Comparison of microcomputed tomography, cone beam tomography, stereomicroscopy, and scanning electron microscopy techniques for detection of microcracks on root dentin and effect of different apical sizes on microcrack formation. *Microsc Res Tech.* 2019;82(10):1748-55.
4. Mizutani R, Suzuki Y. X-ray microtomography in biology. *Micron.* 2012;43(2-3):104-15.
5. Sousa-Neto MD, Silva-Sousa YC, Mazzi-Chaves JF, Carvalho KKT, Barbosa AFS, Versiani MA, et al. Root canal preparation using micro-computed tomography analysis: a literature review. *Braz Oral Res.* 2018;32(suppl 1):e66.
6. Mangione F, Meleo D, Talocco M, Pecci R, Pacifici L, Bedini R. Comparative evaluation of the accuracy of linear measurements between cone beam computed tomography and 3D microtomography. *Ann Ist Super Sanita.* 2013;49(3):261-5.
7. Tayman MA, Kamburoglu K, Kucuk O, Ates FSO, Gunhan M. Comparison of linear and volumetric measurements obtained from periodontal defects by using cone beam-CT and micro-CT: an in vitro study. *Clin Oral Investig.* 2019;23(5):2235-44.
8. Ferrare N, Leite AF, Caracas HC, de Azevedo RB, de Melo NS, de Souza Figueiredo PT. Cone-beam computed tomography and microtomography for alveolar bone measurements. *Surg Radiol Anat.* 2013;35(6):495-502.
9. Demirel A, Demirci O, Okte Z. Accuracy of In Vitro Radiographs in Determining the Remaining Dentin Thickness below Deep Dentin Caries in Deciduous Molars. *Balkan Journal of Dental Medicine.* 2020;24.
10. Suassuna FCM, Maia AMA, Melo DP, Antonino ACD, Gomes ASL, Bento PM. Comparison of microtomography and optical coherence tomography on apical endodontic filling analysis. *Dentomaxillofac Radiol.* 2018;47(2):20170174.
11. Krause F, Kohler C, Ruger C, Park KJ, Ziebolz D, Schneider H, et al. Visualization of the pulp chamber roof and residual dentin thickness by spectral-domain optical coherence tomography in vitro. *Lasers Med Sci.* 2019;34(5):973-80.
12. Majkut P, Sadr A, Shimada Y, Sumi Y, Tagami J. Validation of Optical Coherence Tomography against Micro-computed Tomography for Evaluation of Remaining Coronal Dentin Thickness. *J Endod.* 2015;41(8):1349-52.
13. Savas S, Botsali MS, Kucukyilmaz E, Sari T. Evaluation of temperature changes in the pulp chamber during polymerization of light-cured pulp-capping materials by using a VALO LED light curing unit at different curing distances. *Dent Mater J.* 2014;33(6):764-9.