

DİŞ HEKİMLİĞİNDE MİKRO BT'NİN KULLANIM ALANLARI

MICRO CT IN DENTISTRY

¹*Feyza ÇİVİTÇİ, ²Meral Arslan MALKOÇ

¹Araş. Gör. İnönü Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Bölümü, MALATYA.

²Yrd. Doç. Dr. İnönü Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Bölümü, MALATYA.

Özet

Son birkaç yıldır Mikro bilgisayarlı tomografi (Micro BT) diş hekimliğinde başarıyla kullanılmaktadır. Bu derlemede diş hekimliğinde Mikro BT'nin temel kullanım alanları hakkında genel bir açıklama sunulmuştur. Mikro BT endodonti, protetik diş tedavisi, restoratif diş tedavisi gibi çeşitli dental alanlarda kalitatif ve kantitatif veriler elde etmede kullanılabilir. Mikro BT ile elde edilen görüntüler, diş anatomisini ve diş anatomisinin çeşitli dental tedavilerle nasıl değişiklik göstereceğini araştırmacıların kavramasını sağlayacağından, bu teknoloji eşsiz bir potansiyel araştırma aracıdır. Mikro BT mineralize dokuları üç boyutlu olarak ve çok yüksek çözünürlükte ve magnifikasyonda görüntüleme için kullanılan bir x-ışını görüntüleme teknolojisidir. Günümüzde Mikro BT görüntüleyicisinin çok küçük çaplı olmasından dolayı dental dokuların analizi bu teknoloji ile in vivo ortamda sadece laboratuvar ortamında küçük deney hayvanlarında mümkündür. İnsan dental materyallerinin Mikro BT ile incelenmesi günümüzde sadece cansız ortamda gerçekleştirilebilmektedir. Bu derleme, dental araştırmalarda kullanılan Mikro BT ile ilgili son gelişmeleri içermektedir. Mikro BT'nin mineral konsantrasyonunun ölçümü, materyallerin internal yapısının değerlendirilmesi, kök kanal morfolojisinin, kök kanal preparasyonunun ve kanal dolgusunun değerlendirilmesi, internal ve eksternal lezyonların görüntülenmesi, restorasyonların marjinal uyumunun değerlendirilmesi, dental implantlar, kemik internal yapısı ve ortodontide ve antropolojik çalışmalarda kullanımı özetlenmiştir. Mikro BT'nin avantaj ve dezavantajları belirtilmiş ve son olarak dental araştırmalarda Mikro BT'nin gelecekteki uygulamalarından bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Micro BT, diş hekimliği araştırmaları.

Abstract

Micro computed tomography (Micro CT) has been used in dentistry successfully for a number of years. An overview of some of the main uses of Micro CT in Dentistry is presented. It can be used to produce qualitative and quantitative data, in various dental disciplines like endodontics, prosthetics and restorative dentistry. Its potential as a research tool is enormous since it gives the researchers a unique insight of the anatomy of the tooth and how it varies after certain dental treatments. Micro CT is an x-ray imaging technology used to visualize mineralized tissues in three dimensions and at incredibly high resolution and magnification. Currently, the in vivo analysis of dental tissues by Micro CT is possible only in laboratory animals because of the small diameter imager gantry restrictions; thus, the evaluation of human dental material by Micro CT is currently only possible ex vivo. This review includes the recent advances in X ray microcomputed tomography (Micro CT) used in dentistry investigations. It summarizes Micro CT using in evaluations of mineral density in dental hard tissues, materials' internal structure, root canal morphology, root canal preparation and fillings, visualization of internal and external dental problems, evaluating adaptation of restorations, dental implants, bone internal structure, usage in orthodontics and anthropological studies. The advantages and disadvantages of Micro CT indicated and finally a summary of the future applications of Micro CT in dental research is given.

Key words: Micro CT, dental research.

Giriş

Roentgen'in 1895' te X ışınlarını buluşundan itibaren, diagnostik tıp teknolojisinde insan vücudunun iç işleyişini non-invaziv şekilde incelemeye olanak sağlayan teknolojik devrimler gerçekleşti (1). Bilgisayarlı

tomografi (BT) 1970lerin başlarında geliştirildi. Bundan sonra gelişmiş diagnostik görüntüleme teknolojilerinde devrim yaşandı. Materyallerin ya da dokuların yoğunluklarının uzaysal dağılım haritaları çıkarılarak farklı açılardan elde edilen görüntüler birleştirilip üç boyutlu görüntüler elde edildi (2). BT tarayıcılarla genellikle 1 mm³ hacimde elemanlardan (voksel) oluşan görüntüler elde edilirken, 1980'lerin başlarında geliştirilen mikro BT (µBT) ile 5-50 µm boyutlar arası yani BT'nin voksellerinden yaklaşık 1000000 kat küçük hacimlerde vokseller üretiliyor (3,4).

Son yıllarda, sonlu eleman modelleme (FEM), yapısal, katı ve akışkanlar mekaniği gibi biyomekanik alanında fiziksel olaylar analiz etmek için kullanılan yaygın bir yöntem haline

*İletişim Adresi

Dr. Meral ARSLAN MALKOÇ
İnönü Üniversitesi,
Diş Hekimliği Fakültesi
Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı,
44280 Malatya, TURKEY.

Fax: +90-442-3411107

e-mail: mrlmalkoc@hotmail.com

gelmiştir. Biyomekanikte FEM kullanımı ile araştırma ve öğretim aracı olarak büyük ilerleme kaydedildi. Dental araştırmalarda kullanımı son on yılda oldukça geliştirilmiştir (5,6).

Konvansiyonel BT'nin düşük çözünürlüğü diş ve diş kanalları gibi küçük objelerin rekonstrüksiyonu için yeterli değildir. Mikro BT'nin geliştirilmesiyle vertikal çözünürlük kapasitesi 100-200 μm 'ye yükseldi. Geçen yıllarda çözünürlük 81 μm 'ye, daha sonra 34-68 μm 'ye ve sonra 25-15 μm 'ye kadar arttırıldı. Günümüzde ise <10 μm çözünürlüğe ulaşılmıştır (7).

Mikro BT, üç boyutlu ölçümleri materyallere zarar vermeden yapan bir tekniktir. Mikro BT ile ilgili çalışmalarda genelde sert dokuların rekonstrüksiyonu üzerinde durulmuştur. Yumuşak dokuların görüntülenmesinde polimerlere ihtiyaç duyulur (8). Dişler, kemikler, dental implantlar ve dental restorasyonlar gibi küçük ve kompleks yapıların mikro BT ile taranıp üç boyutlu model analizi ile üç boyutlu görüntülerinin elde edilmesi daha tam ve kesin veriler elde etmemizi sağlar. Dişlerin tüm yapıları yoğunluk derecelerine göre farklı gri tonlarında ve farklı piksel değerlerinde görülmesi mümkündür (9).

Mikro BT'de kaynağın obje etrafında dönmesiyle çok sayıda projeksiyonlar elde edilir. Bu projeksiyonlar X ray charge coupled device (ccd) kamera ve bunun bilgisayara transferi ile elde edilir. Özel yazılımlarla çok sayıda küçük kesitler elde edilir ve rekonstrükte edilir. Böylece 3D görüntü oluşturulur. Mikro BT ve bilgisayarlı X ışınli tomografide temel prensipler aynıdır.

X ışınli tomografi sistemi, numune preperasyonu yada kimyasal fiksasyon gerektirmeden üç boyutlu görüntüleme ve ölçüme izin verir (10).

Mikro BT ile kemik ve diş gibi mineralize dokular, biyomateryaller, polimerler, seramikler gibi çok çeşitli materyaller incelenebilir. Çevre dokulardan daha yoğun bir kontrast madde serpilerek yumuşak dokular da incelenebilir. Bu sistemin gelişmesiyle yeni nesil cihazlarla canlı küçük hayvanlarda invivo görüntüleme yapılabilir (11,12). Diş hekimliğinde diş dokuları ile ilgili ölçümlerde, kök kanal morfolojisinin incelenmesi ve preperasyonun değerlendirilmesinde, kemik gelişimi ve tamirinin değerlendirilmesinde, doku mühendisliğinde, mineral konsantrasyonunun

ölçülmesinde, implantolojide ve implant çevresindeki kemiğin değerlendirilmesinde kullanılır (13).

Mineral Konsantrasyonunun Ölçümü

Mineral yoğunluğunun doğru bir şekilde değerlendirilmesi diş ve kemik dokuları gibi kalsifiye dokuların mineralizasyon derecelerinin anlaşılmasında kritik bilgiler sağlar. Mineral yoğunluğunu belirlemede direkt kimyasal yöntemler, taramalı elektron mikroskobu, laser taramalı mikroskop gibi yöntemler de kullanılabilir. Ancak bu yöntemler örneklerden kesit almayı ve uzun süren analiz işlemleri gerektirir. Ayrıca destrüktif numune preparasyonları gerektirdiklerinden zamansal değişimlerin değerlendirilmesi bu yöntemlerle mümkün değildir (14).

Mikro BT ile mineral yoğunluğunun kalibrasyonunda hidroksiapatit-rezin fantomlar kullanılır. Bu fantomlar ticari Mikro BT üreticileri tarafından sunulur. Scanco Medikal'in sunduğu farklı konsantrasyonlarda hidroksiapatit içeren (0,200,400,600 mg/cm^3) 5 silindirik fantomdan oluşan set buna örnektir. SkyScan'ın sunduğu fantomlar çubuk şeklinde 2, 4, 8 mm çaplarında 50-750 mg/cm^3 konsantrasyon aralığındadır. Son olarak geliştirilen HA- $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve sıvı solüsyon içerikli K_2HPO_4 likit fantomlar sunulmuştur. Genel prensip olarak fantomların ve esas numunenin tarandığı x ışınının indirgemesi ve çevre doku ve su birbiri ile aynı (uyumlu) olmalıdır (13,14).

Neves ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Mikro BT ile dentin çürüğünün kantitatif hacimsel ölçümünü ve mineral yoğunluğunu hesaplamışlardır. Çürük diş, çürüğü temizlenmiş diş ve çürük materyalinin hacimlerini ve mineral yoğunluklarını görüntülemiş ve analiz etmişlerdir. Temizlendiği düşünülen kavitede kalan artık çürüğün miktarını belirlemişlerdir (15). Çalışmadan bir sene sonra aynı cihazları kullanarak yaptıkları çalışmada Neves ve arkadaşları 9 çürük temizleme tekniğini çürük temizleme etkinliği ve minimal invazivlik bakımından karşılaştırmışlardır (16).

Efeoğlu ve arkadaşları karbamid peroksit ile yapılan ağartma tedavisinin diş dokularında oluşturduğu demineralizasyon miktarını araştırmak için Mikro BT kullanmıştır (17). Huang ve arkadaşları da Mikro BT kullanarak sağlam mine, opak mine lezyonu ve

dentin çürüğünün mineralizasyon miktarlarını ölçtüler (18). Hamba ve arkadaşları farklı pat ve solüsyonların mine demineralizasyonunu inhibe etmedeki etkinliklerini karşılaştırmak için yine Mikro BT'den yararlanmışlardır (19).

Materyallerin İnternal Yapısının Değerlendirilmesi

Ölçü materyallerinin yapısı, protezin başarısı açısından önemlidir. Hava kabarcıkları ya da poröziteler ölçünün ve elde edilecek modelin netliğini etkiler. Hamilton ve arkadaşları farklı karıştırma yöntemlerinin aljinat içersindeki hava kabarcığı miktarına etkisini Mikro BT ile yaptıkları çalışmada karşılaştırmışlardır (20).

Kompozit materyallerin büzülmesi ve interfasiyal aralığın direkt olarak ölçülmesi kesit alınmasını gerektirir ve bu zor bir tekniktir (21,22). Yüksek çözünürlüklü topografik tekniklerle materyallerin internal yapısını materyale zarar vermeden incelemek mümkündür. Yapısal unsurların uzaysal lokalizasyonları net şekilde izlenebiliyorsa polimerizasyon büzülmesini monitörize etmek mümkündür (23,24). Cho ve arkadaşları hazırladıkları kavitelere zirkonyum oksit doldurucu içeren kompozit materyali uygulayarak polimerizasyon öncesinde ve sonrasında Mikro BT görüntülerini elde etmişler ve doldurucu hareketinden yola çıkarak büzülme ve polimerizasyon derecelerini tespit etmişlerdir (25). Feng ve arkadaşları da Mikro BT kullanarak karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozitte poröziteyi görüntülediler. Standart kompozitlere göre daha iyi mikro yapı gösterdiğini saptadılar (26). Nomoto ve arkadaşları viskozite ve karıştırma tekniğinin cam iyonomer simanların porözitesi üzerine etkisini araştırmışlardır. Hazırladıkları numunelerin internal yapısındaki hava kabarcıklarını Mikro BT ile görüntülemişlerdir (27).

Kök kanal Preparasyonu ve Kanal Dolgusunun Değerlendirilmesi

Kanal tedavisinde primer amaç kanalda geride kalan mikroorganizma sayısını minimize etmek ve sonrasında da iyi bir apikal tıkaç oluşturmaktır. Günümüzde tedavi konsepti kök kanallarının yeniden şekillendirilmesi, kimyasal temizlik ve akabinde kanalların tıkanması şeklindedir (28). Bu aşamalarda klinisyen üç Cilt / Volume 14 · Sayı / Number 2 · 2013

parametreyi belirlemelidir: kanal boyu, preparasyonun konikliği ve özellikle apikal üçlüdeki horizontal preparasyonun boyutu. Bu parametreler klinikte genelde endodontik el aletleriyle saptanmaya çalışılır ancak, bu yöntem ampirik bir yöntemdir ve gerçek sonuçlar elde edilemeyebilir (29).

Kök kanal morfolojilerini incelemeye makroskobik kesitler, polyester rezin ölçü maddeleri, transparan örnekler ve radyografiler kullanılabilir (30).

Paque ve arkadaşları, (31) kök kanal tedavisinde kullanılan aletlerin apikal uyumlarını, preparasyon öncesi ve sonrasında kök kanal morfolojilerini Mikro BT ile incelemişlerdir. Roggendorf ve arkadaşları da (32) preparasyon sonrası kanal morfolojilerini, kanal dolgusunu ve kanal dolgusu boşaltıldıktan sonra kanalda arda kalan materyali Mikro BT ile görüntülemişlerdir. Jung ve arkadaşları (7) yaptıkları çalışmada kök kanal dolguları yapılmış dişlerden alınan histolojik kesitlerle, Mikro BT görüntülerini karşılaştırarak Mikro BT'nin kök kanal dolgularını incelemeye güvenliliklerini kanıtlamışlardır.

İnternal ve Eksternal Lezyonların Görüntülenmesi

Klinisyenler, internal ve eksternal kök rezorbsiyonlarını sıklıkla karıştırırlar. Bu durumda radyografik açılardırma metodu kullanılabilir (33). Ancak, konvansiyonel radyografik teknikler lezyonun büyüklüğü, lokalizasyonu ve kapsamı hakkında sınırlı bilgi sağlar (34).

Kamburoğlu ve arkadaşları (35) yaptıkları çalışmada simülatif internal rezorbsiyon kavileri hazırlamışlar ve bu kavilerin büyüklüklerini mikro BT ve konfokal lazer tarama mikroskopisi ile ölçmüşlerdir. İki farklı sistemle elde edilen ölçümler birbiriyle korelasyon göstermiştir. Balto ve arkadaşları (36) fareler üzerinde yaptıkları çalışmada periapikal kemik yıkımını Mikro BT ile görüntülemişlerdir. Deneysel amaçla ekspozite edilen pulpanın apikal periodontitise neden olmasını bekleyip daha sonra bu bölgeden elde ettikleri Mikro BT tarama sonuçları ile histolojik kesitleri karşılaştırmışlardır.

Restorasyonların Marjinal Uyumunun Değerlendirilmesi

Yapıştırma simanların çözünürlüğünden dolayı, marjinal açıklığın azaltılması çürük, plak, gıda akümüasyonu ve periodontal hastalıkla sonuçlanan protetik başarısızlıkların azaltılması açısından son derece önemlidir (37).

İnternal uyum ve marjinal açıklıkların ölçümünde farklı metodlar kullanılmıştır. Klinik olarak marjinal uyum kabaca ayna ve sond ile kontrol edilebilir (38). Silikon ölçü materyali ile siman aralığının ölçüsü elde edilebilir. İndirekt olarak ölçü alınıp dişin epoksi rezinden replikası elde edilerek scanning elektron mikroskopunda incelenebilir (39). Laboratuvar ortamında diş ve restorasyondan kesitler elde edilerek mikroskop altında incelenebilir. Yeni bir metod olan mikro BT ile yapılan incelemede restorasyona zarar vermeksizin veriler elde etmek mümkündür (40).

Pelekanos ve arkadaşları (10), dört farklı teknikte elde ettikleri alüminyum oksit korların marjinal uyumlarını mikro BT ile karşılaştırmışlardır. Borba ve arkadaşları da (40) zirkonyum alt yapıli seramik sabit bölümlü protezlerin adaptasyonunu değerlendirmede mikro BT'yi kullanmışlardır.

Kemik ve Eklemelerin Yapı ve Patolojilerinin Görüntülenmesi

Mikro BT, kemik trabeküllerinin mikromimarisinin analiz edilmesine ve mineral yoğunluğunun ölçümüne olanak sağlar (41).

Küçük hayvanlarda eklem bölgesinin incelenmesinde radyografik değerlendirme, süperimpozisyonlar ve artifaktlar nedeniyle yeterli olmaz. Histolojik değerlendirme de hayvanların sakrifiye edilmesini gerektirir. Mikro BT ile non-invaziv, yüksek çözünürlüklü, düşük efektif doz ile canlı hayvanların kemiklerinden kısa sürede net görüntüler elde edilebilir. Zhao ve arkadaşları (42) Hollanda tavşanları üzerinde temporomandibular eklem deviasyonunu ve buna bağlı olarak kondilde oluşan rezorpsiyonu mikro BT taramaları ile incelemişlerdir. Histolojik değerlendirmeyle kondildeki şekil değişimleri tamamen görüntülenemezken mikro BT ile net şekilde görüntülenebilir. Yıkıcı bir yöntem olmadığı için uzun zaman periyotlarında devam eden gözlemlere olanak sağlar. Net, direkt ve hızlı görüntülemeye olanak sağlar (42).

Takada ve arkadaşları (43) yaptıkları çalışmada alt çenedeki üçüncü azı dişleri ve angulus mandibula fraktürleri arasındaki bağlantıyı mikro BT ile analiz etmişler ve kemik hacim oranı, trabekül kalınlığı, trabekül sayısı gibi parametreleri ölçmüşlerdir.

Sugisaki ve arkadaşları (44) ise dişli ve dişsiz mandibular kondilin internal yapısını Mikro BT ile görüntülemişlerdir.

İmplantoloji ve Cerrahi Uygulamalarda Kullanımı

Dental radyograflar farklı oranlarda magnifikasyon gösterir ve sadece iki boyutlu görüntü elde edilebilir (45). Ancak, mikro BT ile implant yerleştirilmesi sonrasında kansellöz ve kompakt kemiğe zarar vermeksizin, kemik biyomekaniği ve sert doku iyileşmesi ile ilgili üç boyutlu veriler elde edebiliriz. İmplantlar, biyomateryaller ve rejeneratif süreçlerle ilgili dental araştırmalar, dental implantlar ve biyomateryallerin kemikle integrasyonunu belirlemede kalitatif ve kantitatif ölçümler gerektirirler (46).

Rebaudi ve arkadaşları (47) insan posterior maksillasına yerleştirdikleri deneysel implantlardan numuneler elde ederek mikro BT ile incelemişler ve implant çevresindeki kemik hakkında veriler elde etmişlerdir.

Butz ve arkadaşları (48) kemik-implant bağlantısı ve mekanik kilitlemenin titanyum implantların stabilitesine potansiyel etkilerini araştırmak için mikro BT ve biyomekanik push-in testini kullanarak fareler üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Morinaga ve arkadaşları da (49) sıçanların tibialarına uyguladıkları implantların çevresindeki yeni kemik oluşum sürecini belirli periyotlarla yaptıkları mikro BT taramaları ile takip etmişlerdir.

Klein ve arkadaşları, (50) kemik greftlerinin gözenekli yapısını incelemede mikro BT'den yararlandılar. Sentetik ve biyolojik yapıdaki greft materyallerini rekonstrükte ederek por kalınlıklarını ve dağılımlarını hesaplamışlardır.

Trisi ve arkadaşları, (51) sinüs grefti uygulanan üç hastadan alınan kemik biyopsilerini değerlendirmek amacıyla standart histomorfometri ve mikro BT kullanmışlardır.

Hollister ve arkadaşları (52) mikro BT ile kraniofasial iskeleti yapısal ve mekanik olarak incelemişler ve mikro BT taraması sonrası orijinal iskelet yapısının görüntü vokselleri

kullanılarak nasıl iyi bir şekilde replikatinin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca mikro BT taraması ile, kemikteki bozulma sırasındaki yapısal değişiklikleri belirlemenin ve madde kaybını kesin olarak saptamanın mümkün olduğunu göstermişlerdir.

Ortodontide Kullanımı

Ortodontik tedavide mekanik etki elde etmek ve cerrahi işlemi güvenli şekilde gerçekleştirmek amacıyla mini-screw implantlardan yararlanır. Bukkal implantasyonun yol açabileceği kök deformasyonu ve sinüs perforasyonu gibi durumlardan kaçınmak için detaylı anatomik değerlendirme gerekmektedir (53). Ishii ve arkadaşları (54) yaptıkları çalışmada üst birinci molar ve ikinci premolar arasındaki interalveoler septum alanını mikro BT ile inceleyerek implant yerleştirme pozisyonunu değerlendirmişlerdir.

Dudic ve arkadaşları, (55) ortodontik tedavinin istenmeyen yan etkilerinden olan kök rezorbsiyonlarını değerlendirmede periapikal radyografların ne ölçüde güvenilir olduğunu araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada radyografik veriler ile mikro BT verilerini karşılaştırmışlardır.

Antropolojik Çalışmalarda Kullanımı

Mine kalınlığının antropolojik çalışmalarda önemli olduğu kabul edilir ve insan evriminin yorumlanmasında taksonomik ve filogenetik değeri vardır. Mine ölçümleri mikro BT ile fosiller üzerinde yıkıcı etki oluşturmadan kullanılabilir (56,57).

Versarini ve arkadaşları (58) arkeolojik kazılarda bulunan eski mayalara ait dişlerdeki inley uygulamalarını mikro BT ile inceleyerek pulpadaki patolojik oluşumları görüntülemişlerdir.

Sonuç

Mikro BT'nin dental çalışmalarda geniş bir kullanım alanı vardır. Özellikle sert dokularda doku ve materyale zarar vermeksizin yüksek çözünürlükte görüntüler elde edilmesine olanak sağlar. Mikro BT yenilikçi ve gelecek vaat eden bir cihazdır. Ancak yüksek radyasyon dozu, tarama ve rekonstrüksiyonun yüksek maliyeti ve görüntüleme süresinin uzun olması rutin klinik uygulamayı engellemektedir. Bu alanda gelişmelerin devam etmesiyle gelecekte

in vivo ve in vitro çalışmalarda daha yüksek çözünürlük oranlarına ulaşılarak daha geniş kullanım alanı sağlanacaktır.

Kaynaklar

1. Dunn PM. Wilhelm Conrad Roentgen (1845–1923), the discovery of X rays and perinatal diagnosis. Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed 2001; 84(2): 138–9.
2. Hounsfield GN . Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. Br J Radiol 1973; 46(552): 1016–22.
3. Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfitt AM, Jesion G, Kleerekoper M. The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography. J Bone Miner Res 1989; 4(1): 3–11.
4. Kuhn JL, Goldstein SA, Feldkamp LA, Goulet RW, Jesion G. Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure. J Orthop Res 1990; 8(6): 833–42.
5. Van Staden RC, Guan H, Loo YC . Application of the finite element method in dental implant research. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2006; 9(4): 257– 70.
6. Mackerle J. Finite element modelling and simulations in dentistry: a bibliography 1990–2003. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2004; 7(5): 277–303.
7. Jung M, Lommel D, Klimek J. The imaging of root canal obturation using micro-CT. Int Endod J 2005; 38(9): 617–26.
8. Aoyagi H, Tsuchikawa K, Iwasaki S. Three dimensional observation of the mouse embryo by micro-computed tomography: composition of the trigeminal ganglion. Odontology 2010; 98(1): 26–30.
9. Verdonschot N, Fennis WM, Kuijs RH, Stolk J, Kreulen CM, Creugers NH. Generation of 3D finite element models of restored human teeth using micro- CT techniques. Int J Prosthodont 2001; 14(4): 310–15.
10. Pelekanos S, Koumanau M, Koutayas S O, Zinelis S, Eliades G. Micro-CT evaluation of the marginal fit of different in-ceram alumina copings. Eur J Esthet Dent 2009; 4(3): 278–92.
11. Guldberg RE, Ballock RT, Boyan BD, Duvall CL, Lin AS, Nagaraja S, Oest M, Phillips J, Porter BD, Robertson G, Taylor WR. Analyzing bone, blood vessels, and biomaterials with microcomputed tomography. IEEE Eng Med Biol Mag 2003; 22(5): 77–83.
12. Guldberg RE, Lin AS, Coleman R, Robertson G, Duvall C. Microcomputed tomography imaging of skeletal development and growth. Birth Defects Res C Embryo Today 2004; 72(3): 250–9.
13. Swain MV, Xue J. State of art of micro-CT applications in dental research. Int J Oral Sci, 2009; 1(4): 177-88.
14. Zou W, Hunter N, Swain M V. Application of Polychromatic µCT for Mineral Density Determination. J Dent Res 2011; 90(1):18-30.
15. Neves A A, Countinho E, Cardoso M V, Jaecques S V, Meerbeek B V. Micro-CT based quantitative evaluation of caries excavation. Dent Mater 2010; 26(6): 579-88.
16. Neves AA, Countinho E, Munck J, Meerbeek BV. Caries removal effectiveness and minimal-invasiveness potential of caries-excitation techniques: A micro-CT investigation. J Dent 2011;39(2):154-62.
17. Efeoglu N, Wood D, Efeoglu C. Microcomputerised tomography evaluation of 10% carbamide peroxide applied to enamel. J Dent 2005; 33(7): 561–7.
18. Huang TTY, Jones AS, He LH, Darendeliler MA, Swain MV. Characterisation of enamel white spot lesions using X-ray micro-tomography. J Dent 2007, 35(9): 737–43.
19. Hamba H, Nikaido T, Inoue G, Sadr A, Tagami J. Effects of CPP-ACP with sodium fluoride on inhibition of bovine enamel demineralization: A quantitative assessment using micro-computed tomography. J Dentistry 2011; 39(6): 405-13.
20. Hamilton MJ, Vandewalle KS, Roberts HW, Hamilton GJ, Lien W. Microtomographic Porosity Determination in

- Alginate Mixed with Various Methods. *J Prosthodont* 2010; 19(6): 478–81.
21. Sato T, Miyazaki M, Rikuta A. Real-time dimensional change in light-cured composites at various depths using laser speckle contrast analysis. *Eur J Oral Sci* 2004;112(6):538–44.
 22. Sato T, Miyazaki M, Rikuta A, Kobayashi K. Application of the laser speckle-correlation method for determining the shrinkage vector of a light-cured resin. *Dent Mater J* 2004;23(3):284–90.
 23. Sun J, Fang R, Lin N, Eidelman N, Lin-Gibson S. Nondestructive quantification of leakage at the tooth-composite interface and its correlation with material performance parameters. *Biomaterials* 2009;30(27):4457–62.
 24. Zeiger DN, Sun J, Schumacher GE, Lin-Gibson S. Evaluation of dental composite shrinkage and leakage in extracted teeth using X-ray microcomputed tomography. *Dent Mater* 2009; 25(10):1213–20.
 25. Cho E, Sadr A, Inai N, Tagami J. Evaluation of resin composite polymerization by three dimensional micro-CT imaging and nanoindentation. *Dent Mater* 2011; 27(11):1070-8
 26. Feng Y, Feng Z, Li S, Zhang W, Luan X, Liu Y, Cheng Y, Ahang L. Micro-CT characterization on porosity structure of 3D Cf/SiCm composite. *Composites* 2011; 42(11): 1645–50.
 27. Nomoto R, Komoriyama M, McCabe J F, Hirano S. Effect of mixing method on the porosity of encapsulated glass ionomer cement. *Dent Mater* 2004; 20(10): 972-8.
 28. Young GR, Parashos P, Messer HH. The principles of techniques for cleaning root canals. *Aust Dent J* 2007; 52(1):52-63.
 29. Jou Y, Karabucak B, Levin J, Liu D. Endodontic working width: current concepts and techniques. *Dent Clin North Am* 2004; 48(1): 323-35.
 30. Kalaycı A, Sevimay S. Üst III. büyük azı dişlerinin kök morfolojisinin şeffaflaştırma yöntemi ile incelenmesi. *Türkiye Klin. Dişhek. Bil. Derg* 1997;3(1):56-61.
 31. Paque F, Zehnder M, Marending M. Apical fit of initial K-files in maxillary molars assessed by micro-computed tomography. *Int Endod J* 2010;43(4):328-35.
 32. Roggendorf M J, Legner M, Ebert J, Fillery E, Frankenberger R, Friedman S. Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *Int Endod J* 2010; 43(3), 200–9.
 33. Trope M, Chivian N, Sigurdsson A, Vann WF Jr. In: Traumatic injuries. In: Pathways of the pulp. Ed. Cohen S, Burns RC. 6th ed. St Louis: Mosby, p: 623–633, 2002.
 34. Björndal L, Carlsen O, Thuesen G, Darvann T, Kreiborg S. External and internal macromorphology in 3D-reconstructed maxillary molars using computerized X-ray microtomography. *Int Endod J* 1999; 32(1): 3–9.
 35. K Kamburoğlu, SF Barenboim, T Aritürk, I Kaffe. Quantitative measurements obtained by micro-computed tomography and confocal laser scanning microscopy. *Dentomaxillofac Radiol* 2008; 37(7): 385–91.
 36. Balto K, Müller R, Carrington DC, Dobeck J, Stashenko P. Quantification of periapical bone destruction in mice by micro-computed tomography. *J Dent Res* 2000; 79(1):35-40.
 37. Holden JE, Goldstein GR, Hittelman EL, Clark EA. Comparison of the marginal fit of pressable ceramic to metal ceramic restorations. *J Prosthodontics* 2009; 18(8): 645–8.
 38. Ömürlü H, Deniz Arısu H, Eligüzeloğlu E, Üçtaşlı MB, Bala O. Gazi üniversitesi diş hekimliği fakültesine başvuran hastaların direkt restorasyonlarının klinik başarısının değerlendirilmesi. *GÜ Diş Hek Fak Derg* 2011;28(1):23-8.
 39. Felton DA, Kanoy BE, Bayne SC, Wirthman GP. Effect of in vivo crown margin discrepancies on periodontal health. *J Prosthet Dent* 1991; 65(3): 357–64.
 40. Borba M, Cesar P F, Griggs J A, Bona A D. Adaptation of fixed partial dentures. *Dent Mater* 2011; 27(11): 1119-26.
 41. Tamminen IS, Isakson H, Aula AS, Honkanen E, Jurvelin JS, Kröger H. Reproducibility and agreement of micro-CT and histomorphometry in human trabecular bone with different metabolic status. *J Bone Miner Metab* 2011; 29(4): 442-8.
 42. Zhao C, Kurita H, Kurashina K, Hosoya A, Arai Y, Nakamura H. Temporomandibular joint response to mandibular deviation in rabbits detected by 3D micro-CT imaging. *Arch Oral Biol* 2010; 55(12): 929 – 37.
 43. Takada H, Abe S, Tamatsu Y, Mitarashi S, Saka H, Ide Y. Three dimensional bone microstructures of the mandibular angle using micro-CT and finite element analysis: relationship between partially impacted mandibular third molars and angle fractures. *Dent Traumatol* 2006; 22(1): 18–24.
 44. Sugisaki M, Agematsu H, Matsunaga S, Saka H, Sakiyama K, Ide Y. Three-Dimensional Analysis of the Internal Structure of the Mandibular Condyle in Dentulous and Edentulous Jaws Using Micro-CT. *Cranio* 2009; 27(2): 78-87.
 45. Çelik İ, Toraman M, Mihçioğlu T, Ceritoğlu D. Dental implant uygulamasında kullanılan radyografik yöntemlerin değerlendirilmesi. *Türkiye Klinikleri J Dental Sci* 2007; 13(28):21-8.
 46. Garetto LP, Chen J, Parr JA, Roberts WE. Remodeling dynamics of bone supporting rigidly fixed titanium implants: A histomorphometric comparison in four species including humans. *Implant Dent* 1995; 4(4): 235–43.
 47. Rebaudi A, Koller B, Laib A, Trisi P. Microcomputed Tomographic Analysis of the Peri-Implant Bone. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2004; 24(4): 316–25.
 48. Butz F, Ogawa T, Chang TL, Nishimura I. Three-Dimensional Bone-Implant Integration Profiling Using Micro-Computed Tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2006; 21(5):687-95.
 49. Morinaga K, Kido H, Sato A, Watazu A, Matsuura M. Chronological changes in the ultrastructure of titanium-bone interfaces: analysis by light microscopy, transmission electron microscopy, and micro-computed tomography. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2009; 11(1): 59-68.
 50. Klein M, Goetz H, Pazen S, Al-Navas B, Wagner Wilfried, Duschner H. Pore characteristics of bone substitute materials assessed by microcomputed tomography. *Clin. Oral Impl. Res* 2009; 20(1): 67–74.
 51. Trisi P, Rebaudi A, Calvari F, Lazzara R J. Sinus graft with Biogran, autogenous bone, and PRP: A report of three cases with histology and micro-CT. *The Int J Periodontics Restorative Dent* 2006; 26(2): 113-25.
 52. Hollister SJ, Lin CY, Saito E, Lin CY, Schek RD, Taboas JM, Williams JM, Partee B, Flanagan CL, Diggs A, Wilke EN, Van Lenthe GH, Müller R, Wirtz T, Das S, Feinberg SE, Krebsbach PH. Engineering craniofacial scaffolds. *Orthod Craniofac Res* 2005; 8(3): 162–73.
 53. Kanomi R, Sone Y, Inoue M. Orthodontic treatment utilizing K-1 system. *Dental Outlook* 2002; 99:671-7.
 54. Ishii T, Kunihiko N, Yasushi N, Takashi T, Yamaguchi H. Evaluation of the implantation position of mini-screws for orthodontic treatment in the maxillary molar area by a micro CT. *Bull Tokyo Dent Coll* 2004; 45 (3): 165-72.
 55. Dudic A, Giannopoulou C, Martinez M, Montet X, Kiliaridis S. Diagnostic accuracy of digitized periapical radiographs validated against micro-computed tomography scanning in evaluating orthodontically induced apical root resorption. *Eur J Oral Sci* 2008; 116(5): 467-72.
 56. Olejniczak AJ, Grine FE. High-resolution measurement of Neandertal tooth enamel thickness by micro-focal computed tomography. *S Afr J Sci* 2005; 101(5/6): 219–20.
 57. Olejniczak AJ, Grine FE. Assessment of the accuracy of dental enamel thickness measurements using microfocal X-ray computed tomography. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol* 2006; 288(3): 263–75.
 58. Versarini MA, Sousa –Neto MD, Pecora JD. Pulp pathosis in inlayed teeth of the ancient Mayas: a microcomputed tomography study. *Int Endod J* 2011; 44(11): 1000–4.