

Mikro-BT

Hikmettin Demir¹

Özet

Biyolojik bir yapının bilgisayarlı tomografi veya mikro bilgisayarlı tomografi (Mikro-CT) tarama verilerinin işlenmesi ve daha sonra üç boyutlu modelinin dijital ortamda modellenmesi, çok sayıda alanda kendine özgü uygulama alanları yaratmaktadır. Mikro-CT işlemi, dişin sert dokularının nitel ve nicel değerlendirmesini sağlayan bir yöntemdir. Mineral yoğunluklarını değerlendirerek erken olası çürük lezyonlarının teşhisinde katkı sağlar. Çürüklerin lokalizasyonunu ve genişliğini belirlemede doğru sonuçlar sağladığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Mikro-CT hem mineralize olmuş sert dokuların hem de yumuşak doku ve materyallerin görüntülenmesine imkan tanır. En önemli avantajı kullanılan objelerin zarar görmemesi ve ölçümlerin tekrarlanabilmesidir.

1. GİRİŞ

1990'larda bilgisayar alanındaki gelişmelerle diş hekimliğinde önemli ilerlemeler meydana gelmiştir. Dijital fotoğraflar, radyograflar ve 3D modelleri de dahil olmak üzere dijital görüntüleme teknikleri, ortodonti, cerrahi ve diğer dallarda oldukça önemli ve radikal değişikliklere yol açmıştır (Bookstein, 1983; Görgen, Güler, & Kızılcı, 2014). Görüntülemenin amacı, 3D anatomiyi hem statik hem de fonksiyonel durumlarda görüntülemek, yani anatomik gerçekliği tam olarak yansıtmaktır (Harrel & Nunn, 2001).

Masaüstü sistemlerde, x-ışını cone-beam, x-ışını büyütmek için kullanılır. Bu nedenle, Feldkamp ve arkadaşları (Feldkamp, Davis, & Kress, 1984) tarafından 1980'lerin sonlarında bir cone-beam yeniden yapılandırma algoritmasının geliştirilmesi, masaüstü mikro-CT'yi büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. Mikro-CT ilk olarak 1980 başlarında Jim Elliott (Elliott, Davis, & Dover, 2008) tarafından geliştirilmiş ve ilk önce küçük bir

1 Dr. Öğr. Üyesi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı
hikmettindemir@yyu.edu.tr, Orcid: 0000-0002-1171-4821

yılan üzerinde 50 μm çözünürlükle incelenmiştir. 1999'da Rhodes (Rhodes, Ford, Lynch, Liepins, & Curtis, 1999), mikro-CT'yi deneysel endodontik çalışmalar için kullanmıştır (Şahin & Topuz, 2014). Son otuz yılda, mikro-CT görüntüleme, daha yüksek kaliteli çözünürlük, konik ışın rekonstrüksiyon algoritmasının kullanılması ve invaziv olmayan küçük hayvan görüntüleme araştırmaları için özel tarayıcıların artmasıyla hızla ilerlemiştir (Cavanaugh et al., 2004).

Gömük dişlerin teşhisi için oldukça kullanışlı olan CBCT teknolojisi, uzaysal ve kontrast rezolüsyonu yüksek görüntülerin elde edilmesinde hasta dozunun artmasına sebep olmaktadır (Nur & Şahmaran, 2022). Başlangıçta mikro-CT çok iyi bir uzaysal çözünürlük gösterse de yumuşak doku kontrastı zayıf olmaktadır. Bundan dolayı, mikro-CT uygulamaları ile ilgili çalışmalar daha çok kemikler veya implantlar gibi yüksek yoğunluklu yapıların invaziv olmayan değerlendirilmesine odaklanmıştır. X-ışını detektör sistemlerindeki gelişmelerle birlikte çözünürlükte ve okuma hızında anlamlı gelişmeler sağlanmıştır. Bunlara ilaveten, yumuşak dokunun daha iyi görüntülenmesi için kontrast maddelerin kullanılmasıyla mikro-CT yumuşak doku yapıları ve damar morfolojisini değerlendirmek için klinik araştırmalarda da kullanılabilir hale gelmiştir (Schambach et al., 2010). Günümüzde mikro-CT birçok alanda ilgi görmüş ve rutin bir mikroskopi tekniği haline gelmiştir.

Biyolojik bir yapının bilgisayarlı tomografi (BT, Computed Tomografi-CT)) veya Mikro-CT tarama verilerinin işlenmesi ve daha sonra üç boyutlu modelinin dijital ortamda modellenmesi, çok sayıda alanda kendine özgü uygulama alanları yaratmaktadır. 3D görüntüleme teknolojisi son 20 yılda önemli ölçüde gelişmiştir. Bu yöntemde ortodonti, ağız ve çene cerrahisinde birçok uygulama teknolojisi bulunmaktadır. 3D görüntüleme, bir bilgisayar önceden belirlenmiş anatomik veri sistemini tanıda kullanılacak yerlere aktarır. Daha sonra bu görüntülere iki boyutlu (2D) bir monitör sisteminde derinlik eklenir ve görüntülerin 3D verileri sağlanır. Ortodonti ve cerrahideki 3D görüntüleme tedavi programları, tedavi öncesinde ve sonrasında dento-kranial tedavileri, yüz kaybını, 3D tedavi planını ve yumuşak ve sert dokularda oluşabilecek muhtemel değişikliklerin değerlendirilmesini kapsar (Görgen et al., 2014; Hajeer et al., 2004).

2. Mikro-CT Cihazın Yapısı

Mikro-CT tarayıcılarındaki teknolojiler temel olarak aynıdır ancak CT görüntüsünün kalitesi ve çözünürlüğüne ve belirli bir zaman diliminde görüntülenebilen 3D hacmin boyutuna bağlı olarak ayrıntılarda farklılık gösterir. Arttırılmış büyütme genellikle belirli bir detektör boyutu için daha

küçük bir hacmin görüntülenmesiyle sonuçlandığından, yüksek büyütmede daha büyük hacimlerin görüntülenmesi daha büyük dizi boyutları veya daha küçük dizilerin desteklenmesini gerektirir (Ritman, 2011).

2.1. X-ışını: Üretimi ve Etkileşmesi

Hem düzlemsel radyografinin hem de CT'nin temeli, çeşitli dokular tarafından X ışınlarının emilmesidir. X-ışınları, kemik ve küçük kalsifikasyonlar veya yumuşak dokularda farklı şekilde emilir. Bir kaynaktan üretilen X ışınları, hastaya doğru gönderilir. Hastadan geçen x ışınları, hastanın hemen altına yerleştirilen detektöre ulaşırlar. Burada tespit edilen x-ışını enerjisi önce ışığa, sonra voltaja dönüştürülür ve son olarak sayısallaştırılır. Dijital görüntü, x ışını kaynağı ile detektör arasında kalan dokuların iki boyutlu bir projeksiyonunu temsil eder (Smith & Webb, 2010).

2.1.1. X-ışını tüpü

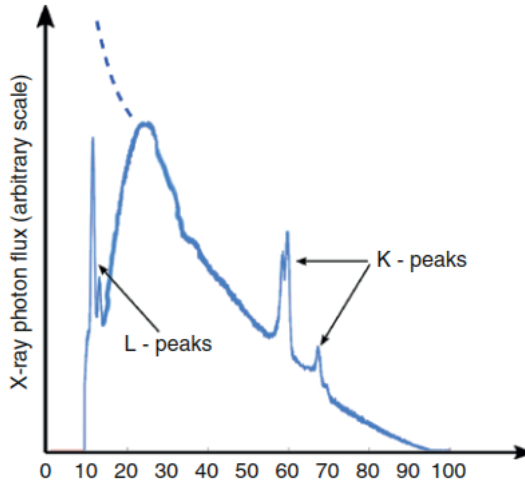
Hem radyografi hem de CT için x-ışını kaynağı, x-ışını tüpü olarak bilinen bir ekipmandır. X-ışını sisteminin tüm bileşenleri, havası boşaltılmış bir cam tüp içindedir. Cam tüp, hem soğutma hem de elektriksel izolasyon için yağla çevrilidir. Tüm düzenek, içinden x-ışını demetinin yayıldığı cam pencereleli bir kurşun kalkanla çevrilidir. X-ışınları, yüksek enerjili elektron demetinin bir metal yüzeye çarpmasıyla üretilir. Bu elektronların kaynağı negatif yüklü bir katottur ve içinden elektrik akımı geçebilen tungsten bir tel sarmalından oluşur. Telin sıcaklığı 2200 °C'ye ulaştığında, elektronlar metal yüzeyi terk edecek yeterli enerjiye sahip olurlar (Smith & Webb, 2010; Nur, Şahmaran & Serindere, 2021).

2.1.2. X-ışını spektrumu

Anot ve katot arasında 25 ile 140 kV arasında bir potansiyel farkı uygulanır, böylece katotta üretilen elektronlar elektrik alan etkisiyle anoda çekilir ve yüksek hızlarda anoda çarpar. Bu esnada oluşan potansiyel farkına, ivmelenme voltajı denir. Yüksek enerjili elektronlar anot yüzeyine çarptığında, kinetik enerjilerinin bir kısmı x-ışınlarına diğer kısmı ise ısı enerjisine dönüşür (Smith & Webb, 2010).

Elektronlar enerjilerini çoğunlukla ısı şeklinde verirler. X-ışınlarının çoğu, elektronların "bremsstrahlung" adı verilen ve sürekli bir enerji spektrumu oluşturan ani yavaşlaması sonucu üretilir. X-ışınlarının üretildiği ikinci bir aşama daha vardır. Bu olay en içteki atomik kabuğun (K kabuğu) yörüngesel bir elektronun o enerji durumundan çıkması ve düşük enerjili bir yörüngeden farklı bir serbest elektronun boşalan yörüngeyi doldurması ile yapılan ışınma

şeklinde olur. Bu ışına ile oluşan x-ışını bremsstrahlung ile oluşan sürekli spektruma eklenen hedef materyalin K yörüngesinin enerjisine karşılık gelen tepeler şeklinde kendini gösterir. Farklı enerjilerin oluşmasına neden olan L kabuğu gibi yörüngelerden oluşan x-ışını pikleri oluşsa da pratik açıdan çok bir önemleri yoktur. Genelde oluşan bu karakteristik radyasyonlar toplam X-ışını akısının çok küçük bir kısmını oluştururlar (Şekil 1) (Orhan, 2020).



Şekil 1. Tungsten anotlu X-ışını tüpünden elde edilen bremsstrahlung ve karakteristik radyasyon pikleri (filtrelemeden sonra) (Orhan, 2020).

2.2. Güç Üretimi

X-ışınlarının üretiminde tüp çok önemli olmakla beraber, yüksek gerilim kaynağı da bir o kadar önemlidir. Eskiden, anot-katod devresini beslemek için yüksek voltaj üretimi, yüzlerce kat yükseklik faktörüne sahip transformatörle basitçe elde ediliyordu. Transformatör, düşük frekanslı şebeke elektrik gücünü anot devresi için gereken yüksek voltaja yükseltir. Alternatif akım genellikle doğrudan x-ışını tüpü tarafından doğrultulurdu. Ancak bu nispeten basit, sağlam ve ucuz bir tasarımın bazı eksiklikleri vardı. Özellikle KV dalgalanmalarını doğru bir şekilde kontrol etmenin zorluğu hatta imkansızlığı, çok kısa süreli doğru bir şekilde kontrol edilen emisyonları vermenin zorluğu, önemli dalgalanma, hacim ve ağırlık gibi eksiklikler vardı. Yeni tasarlanan tüm yüksek voltaj jeneratörleri artık sözde DC tipindedir (doğru akım için DC) veya “yüksek frekanslı”dır. Bu durumda, şebeke elektrik gücü ilk olarak doğru akıma yönlendirilir, bir elektronik güç dönüştürücü ile orta frekansta (5-200 kHz aralığı) stabilize kare dalgaya dönüştürülür ve manyetik devre kullanan geleneksel bir düşük frekanslı transformatörden çok

daha kompakt ve hafif olan bir “yüksek frekanslı” transformatör aracılığıyla istenen yüksek voltaja yükseltilir. Transformatörden sonra, voltaj düzeltilir ve/veya daha da yükseltilir ve çok kısa olabilen, küçük dalgalanmalı ve hassas şekilde kontrol edilen süreye sahip, oldukça stabil bir DC voltajı olarak X-ışını tüpüne iletilir (Orhan, 2020).

2.3. Görüntü Detektörleri

Mikro-CT’de ışın koni şeklinde uzaklaştığından, detektörünün doğrusal olmayıp alan detektörlü olmasından ötürü, konvansiyonel CT gurubunda değildir. Ayrıca x-ışını filmleri, görüntü detektörü ve ekran olarak bir araya getirilmişti. Yeni radyografik sistemler ise elektronik detektörler kullanıyor ve görüntü işleme, görüntüleme ve depolama işlemleri için farklı alt bileşenlere atıyor (Orhan, 2020).

X-ışını detektörleri genellikle bir veya iki boyutlu detektör sistemi kullanır. Detektörler doğrudan X-ışınlarını algılamak için değil, bir sintilatörün aracılığıyla gelen X-ışınlarını fotonlara dönüştürmek ve kamera sistemleri görünür ışığı algılamak için tasarlanmıştır. Algılama işlemi, bir lens sistemi veya bir fiber optik kanal plakası ile yapılabilir (Orhan, 2020). Enerji bütünleştirici ve enerji ayırt eden detektörler, mikro-CT detektörleri için iki kategoridir. Genellikle, enerji bütünleştirici detektörler mikro-CT sistemlerinde kullanılır (Iglauer & Lebedev, 2018). Sintilatör ekranlarla birleştirilmiş cihazlar, mikro-CT sistemlerinde en yaygın kullanılan detektörlerdir. Tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS) detektörleri, geniş alanları ve yüksek kare hızları nedeniyle son zamanlarda kullanılmaktadır (Orhan, 2020). Foton sayan X-ışını detektörleri (PCXD), detektör tipinin ikinci kategorisi olan enerji ayırt eden detektörlerdir. Silisyum (Si), galyum arsenit (GaAs) ve kadmiyum tellür (CdTe) bu detektörlerde sensör malzemesi olarak kullanılır ve detektör sinyalindeki gürültüyü ortadan kaldırma avantajına sahiptir (Badea, 2018). Detektör, görüntüleri görüş alanı (FOV) ile yakalar. Bazen FOV taranan objeden daha küçüktür; daha sonra FOV, detektörün “ofset detektörü” yer değiştirmesiyle iki katına çıkarılabilir. Ofset detektörü objeden asimetric projeksiyonu alır ve bu durum yeniden görüntü oluşturma sürecinde kullanılır (Sharma et al., 2014).

Görüntü verileri $f(x,y,z)$ genellikle doğrusal fonksiyonu ile depolama öncesinde CT değerlerine dönüştürülür

$$CT = \frac{f - \mu_{water}}{\mu_{water}} \cdot (1.000) HU$$

HU, Hounsfield birimini ifade eder. Burada ilişki havanın -1.000 HU CT değerine sahip olması ve CT tarayıcılarının en sık olarak kalibre edildiği malzeme olan suyun 0 HU değerine sahip olmasına dayanmaktadır. CT değerleri, Hounsfield tarafından oldukça kullanışsız mikro (μ) değerleriyle yapılan işlemlerin yerine tamsayı değerli bir nicelik koymak için tanıtılmıştır. Bir pikselin veya vokselin CT değeri, ilgili konumdaki suyun yoğunluğuna göre objenin yoğunluğu olarak yorumlanabilir. Örneğin, 200 HU, o konumdaki obje yoğunluğunun suyun yoğunluğunun 1,2 katı olduğu anlamına gelir. Bu yorumlama yalnızca polikromatik etkiler göz ardı edilebildiğinde doğrudur. Aksi takdirde değerler yoğunluğa yaklaşık değerlerdir ve tam bilgiyi elde etmek için yinelenmeli bir ışın düzeltilmesi yapılması gerekir. CT değerleri genellikle çok yoğun malzemeler veya çok düşük enerjilerdeki taramalar hariç 1.000 ila 4.000 HU arasında değişir (Kachelrieß, 2008).

3. Mikro-CT Cihazının Kullanım Alanları

Mikro-CT işlemi, dişin sert dokularının nitel ve nicel değerlendirmesini sağlayan bir yöntemdir. Mineral yoğunluklarını değerlendirerek olası erken çürük lezyonlarının teşhisinde katkı sağlar. Çürüklerin lokalizasyonunu ve genişliğini belirlemede doğru sonuçlar sağladığı yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Çetinsoy & Yazıcıoğlu, 2021; Kamburoğlu et al., 2011; Schwass, Swain, Purton, & Leichter, 2009).

Mikro-CT sistemi, mikro odaklı bir x-ışını kaynağı, CCD kamera ve obje işlemcisinden oluşur. Tarayıcı kontrolü, kesit edinimi, yeniden yapılandırma ve veri görüntüleme, 3D görüntüleme ve analiz için üretilmiş bir yazılıma sahiptir (Er, 2013).

Mikro-CT kullanılarak insan hastalıklarının fenotiplenmesi hayvan modellerine göre daha az yerleşiktir, ancak bu teknikler popülerlik kazanarak, insan patolojisine yeni bakış açıları sunabilmektedir (Hutchinson et al., 2017).

CT görüntüleri, objeler boyunca düzlemsel dilimlerden oluşturulabilir. Bunlar fiziksel kesitler, optik kesitler veya CT rekonstrüksiyonları olabilir (Rhodes et al., 1999). Sert dokuların incelenmesinde x-ışını bilgisayarlı transaksyonel mikro CT'nin geliştirilmesi giderek önem kazanmıştır (Kuhn et al, 1990; Müller & Rueggsegger, 1997). Hem yazılım hem de donanımda yapılan önemli iyileştirmeler, kesit kalınlığını konvansiyonel CT aralıklarına göre azaltmaktadır (Gambill, Alder & del Rio, 1996). 100 μ m çözünürlüğe sahip minyatür CT tekniğinin, dişlerin ex vivo 3D rekonstrüksiyonunda tahribatsız bir teknik olarak yararlı olduğu kanıtlanmıştır (Bjørndal et al, 1999; Dowker, Davis, & Elliott, 1997). CT, dişlerdeki mine kalınlığını

ölçmek, dişlerin yüzey alanlarını ve hacimlerini ölçmek için kemik yapısını gözlemek amacıyla kullanılmaktadır (Elliott & Dover, 1984; Oi, Saka, & Ide, 2004; Spoor, Zonneveld, & Macho, 1993). Ayrıca restoratif diş hekimliğinde araştırma amaçlı da kullanılmaktadır (De Santis et al., 2005; Verdonschot et al., 2001). Günümüzde mikro-CT günlük klinik ortamda kullanıma uygun değildir; ancak konik ışınlı CT teknolojisi diş hekimliği alanında hızla gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır (Vannier et al., 1997; Nur & Şahmaran, 2022).

Mikro-CT diş hekimliğinin birçok alanında kullanılmakla beraber, bu konulardaki araştırmalar artmaktadır. Bu görüntüleme yönteminin kullanım alanları arasında doku mühendisliği, FEM analizi için gerçek verilerin belirlenmesi, dişlerdeki mineral konsantrasyonunun belirlenmesi ve antropolojik çalışmalarda minenin kalınlığının, kraniyofasiyal kemiklerin yapısının ve gelişiminin ölçülmesi ve endodontik çalışmalarda implantların ve çevreleyen kemiğin değerlendirilmesi yer almaktadır (Erpaçal, Adıgüzel, & Cangül, 2019).

Özellikle endodontik çalışmalarda bu yöntemin sağladığı kolaylıklar sayesinde kök kanallarının morfolojisinin belirlenmesi, preparasyonların kontrol edilebilmesi, dolguların değerlendirilmesi ve tedavi sonrası tetkiklerin yapılabilmesi mümkün olmaktadır (Erpaçal et al., 2019; Kong et al, 2010; Şahin & Topuz, 2014).

3.1. Endodontik Uygulamalar

Endodontik tedavi, tedavinin başarısını belirleyen birkaç adım içerir. Kök kanal sisteminden mikrobiyal enfeksiyonu önlemek için temizleme ve şekillendirme prosedürleri uygulanır. Tedavinin bu aşaması, sulama solüsyonları kullanılarak manuel olarak veya döner aletlerle gerçekleştirilir. Kök kanal sisteminden mikroorganizmalar azaltıldıktan sonra, temizlenen alanı tamamen doldurmak ve sızıntıyı önlemek için bir blokaj maddesi kullanılır. Malzemelerin ve tekniklerin yeteneğini analiz etmek için çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Ancak, kullanılan yöntemlerin sınırlamaları vardır. Mikro-CT, endodontik araştırmanın perspektifini genişletmiştir. Bu teknoloji, endodontik tedaviyle ilgili anatomiye, teknikleri ve malzemeleri değerlendirmede yaygın olarak uygulanmıştır (Marciano et al, 2012).

3.1.1. Kök kanal morfolojisinin analizi

İyi bir kanal tedavisi yapabilmek için dişlerin karmaşık iç anatomisini kapsamlı bir şekilde anlamak zorunludur. Birçok dişte lateral kanallar, apikal dallanma, istmuslar ve C şeklinde kanallar gibi düzensizlikler vardır (Erpaçal et al., 2019; Şahin & Topuz, 2014; Vier-Pelisser et al., 2010).

Gelişimsel dental anomaliler gösteren dişlerin morfolojik incelemesi için daha ileri çalışmalar faydalı olacaktır. Özetle, mikro-CT ile görüntülemenin deneysel endodontide kök kanal morfolojisinin ileri analizi için yararlı bir yöntem olabileceği öngörülebilir (Gu, Zhang, Liao, & Fei, 2013; Yeri, 2015).

3.1.2. Kök kanal preparasyonunun değerlendirilmesi

Başarılı endodontik tedaviler birkaç etkene bağlıdır, bunların en önemlisi kanal preparasyonunun aşamasıdır. En iyi şekilde yapılan ilk preparasyon, mekanik debridman dahil olmak üzere tüm sonraki prosedürlerin etkinliği için önemlidir (Swain & Xue, 2009). Mikro-CT ile görüntüleme sonucunda, enstrümantasyon uygulanan kök kanalı yüzeylerindeki değişimler, oluşan transportasyon, kanal hacmi, kanal genişliği, kaldırılan dentin hacmi, preparasyon öncesi ve sonrası oluşan değişimler değerlendirilebilmektedir (Erpaçal et al., 2019; Keleş & Alçın, 2015; Yakıncı et al., 2016).

Bu yöntemle farklı kanal aletlerinin preparasyon üzerindeki etkisi değerlendirilebildiği gibi, farklı çaplardaki aynı tip eğelerin kullanımı sonucu oluşan değişiklikler de ortaya çıkarılabilir. Ayrıca, yeniden tedavi için eğelerin ve farklı kanal dolgu malzemelerinin etkisinin karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur (Erpaçal et al., 2019; Keleş & Alçın, 2015).

3.1.3. Sulama ve sert doku kalıntılarının birikmesi

Enstrümantasyon sırasında, sert doku kalıntılarının kök kanalındaki dallanma ve girintilere kadar uzanan boşlukları doldurduğu görülmüştür. Kalıntının yapıştığı alanları belirlemek için, hazırlamadan önce hava veya sıvı görünümüyle yumuşak dokuyu, ancak işlemten sonra radyoopaklığı gösteren mikro-CT ile vokseller belirlenmiştir. Böylece sert doku kalıntılarının birikimiyle karşılaşılabılır ve bu birikim üzerindeki irrigasyon solüsyonu türünün ve uygulanan yöntemlerin etkisi belirlenebilir (Paqué, Rechenberg & Zehnder, 2012). Ancak, yöntemin bir dezavantajı, nekrotik dokuların yumuşak doku kalıntılarıyla birlikte görülmemesidir. Ayrıca, sert doku kalıntıları dentinle benzer bir görünüm sunduğundan, preparasyon sırasında kanal duvarından çıkarıldıktan sonra tekrar kalıntıyla dolaşan vokseller ayırt edilemez (Paqué, Boessler & Zehnder, 2011). Bu yöntemler, irrigasyon solüsyonunun kök kanalı üzerindeki kimyasal etkilerini belirleyemese de, ulaşılan alanları görüntülemek için kontrast boya kullanan çalışmalar mevcuttur; ancak daha önceki bir çalışmada, irrigasyon solüsyonlarının yeniden tedavideki rolünün tartışmalı olduğu bulunmuştur (Keleş & Alçın, 2015; Rossi-Fedele & Ahmed, 2017).

Kök kanalındaki kalsiyum hidroksitin (CH) CanalBrush, Vibringe, lazerle aktive edilen irrigasyon (LAI), geleneksel şırınga irrigasyonu (CSI), XP-endo Finisher ve pasif ultrasonik irrigasyon (PUI) ile uzaklaştırılmasının etkinliğini karşılaştıran bir çalışmada mikro-CT kullanıldı. Sodyum hipoklorür solüsyonunun farklı cihazlarla aktivasyonunun kanalın apikal ve orta bölümlerindeki CH'nin uzaklaştırılmasına katkıda bulunduğu ve sırasıyla kanalın orta ve apikal üçte birlik kısımlarında PUI ve LAI yöntemleriyle daha iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna varıldı (Göktürk et al, 2018).

Görüntüleme yöntemlerinin hiçbiri, tek bir görüntüde mikro yapı, işlev ve moleküler süreçler hakkında tüm bilgileri sağlamaz. Gerçekten de, her yöntemin tarayıcıları, organ mikro yapısının ve/veya işlevinin belirli bir yönünün görüntülenmesini optimize etmek için fiziğin belirli bir yönüne özel vurgu yapmalıdır. Sonuç olarak, bireysel CT görüntüsünün herhangi bir görüntüleme yöntemi için mümkün olan uygulamaların tam aralığını sağlaması olası değildir. Ancak, bu tür sınırlamalar genellikle mikro CT'nin başka bir görüntüleme yöntemiyle birlikte kullanılmasıyla hafifletilebilir ve böylece elde edilen görüntü verilerinin duyarlılığı ve/veya özgüllüğü büyük ölçüde artırılabilir. Birden fazla yöntemin bu sinerjik kullanımının gerekli bir yönü, 3D anatominin doğru mekansal ve zamansal kaydının elde edilmesidir (Göktürk et al, 2018).

3.1.4. Kök kanalının doldurulmasının değerlendirilmesi

Endodontik tedavinin başarılı sayılabilmesi için, tüm boşluklara homojen adaptasyon gösteren, kök kanalını tamamen ve sızıntı olmadan kapatan 3D bir kanal dolgusu gereklidir. Kanal dolgu materyali ile dentin arasında veya homojen olarak doldurulamayan boşluklarda herhangi bir potansiyel mikro sızıntı, tedavi başarısı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Mikro-CT, şu anda mikro sızıntı çalışmalarında kullanılacak en iyi yöntemdir (Keleş & Alçın, 2015; Kurt & Orhan, 2016). Kök kanal dolgularında kalan boşlukların incelenmesi için histolojik kesitler mikro-CT yöntemi ile karşılaştırıldığında güçlü bir korelasyon bulunmuştur. Ayrıca bu yöntemle isthmus bölgelerine ulaşan dolgu materyali ve dallanma belirlenebilmiştir. Mikro-CT ile görüntüler elde edildikten sonra bilgisayarda işlenerek boşluklar farklı yoğunluklarda kanal macunu, gutta perka veya farklı renklerle boyanabilir veya şeffaf hale getirilebilir (Keleş, Ahmetoğlu, & Uzun, 2014).

3.1.5. Tekrarlanan tedavi prosedürlerinden sonra kök kanalında kalan dolgu malzemesinin değerlendirilmesi

Epidemiyolojik çalışmalar, periradiküler radyolüsenli bir popülasyonda kök kanal dolgulu dişlerin >%40'ının endodontik enfeksiyonla uyumlu

olduğunu göstermiştir (Chen et al., 2007). Vakaların çoğunda tercih edilen tedavi kök kanal sisteminin ortograd boşaltılmasıydı. Kök kanal boşluğu, periradiküler iyileşme için daha uygun koşullar yaratma amacıyla dezenfekte edilir. Bu nedenle, mevcut kök kanal dolgusunun çıkarılması gerekir. Mikro-CT tahribatsız bir görüntüleme yöntemi olduğundan, çıkarma sırasında kanal alanının kademeli olarak genişlemesinin değerlendirilmesi için en uygun yöntemdir (Roggendorf et al., 2010; Şahin & Topuz, 2014). Bu şekilde, çıkarılan dentin miktarının ve kanal hacminin 3D değerlendirilmesi yapılabilmekte, ayrıca kanal dolgu materyalinin çıkarılmasında kullanılan aletin etkinliği görülebilmektedir (Erpaçal et al., 2019; Kurt & Orhan, 2016).

3.2. Ortodontik çalışmalar

Mikro-CT ortodontide, bölgedeki kemik gelişimini takip ederek değerlendirmek ve diş hareketi sırasında kemikte oluşan modifikasyonları saptamak amacıyla kullanılır (Mulder et al, 2006; Wang et al, 2018). Ayrıca ilaçların diş hareketi üzerindeki etkisini mikro-CT kullanarak saptayan çalışmalar da mevcuttur (Mena Laura et al., 2019).

3.3. Periodontolojik-Cerrahi operasyonlar

Diş hekimliğinde, çene kemiğinin çeşitli rahatsızlıklar ve hastalıklarla birlikte araştırılmasında, kemikte lezyon geliştiğinde veya cerrahi işlemler gerekliliğinde oluşan değişikliklerin değerlendirilmesinde bu yöntem oldukça faydalı olmaktadır (Blok et al, 2013; Rabelo et al., 2018). Kemik doku analizleri için gerekli örnek hazırlama ve örnek tutucunun mikro-CT ünitesi içerisinde konumlandırılması standartlaştırılmalıdır (Irie et al., 2018).

3.4. Restoratif Tedavi Uygulamaları

İnsan dişindeki mineral konsantrasyonunun analizi için ticari bir mikro-CT sistemi kullanan bir çalışmada, cihazın mine ve dentinde dıştan içe daha yüksek bir mineral içeriği belirleyebildiği gözlemlendi. Elde edilen veriler literatürle karşılaştırıldığında, mikro-CT'nin dişlerin mineral içeriğinin tespiti için oldukça uygun olduğu sonucuna varıldı (Clementino-Luedemann & Kunzelmann, 2006). Mine lezyonlarının mineral dağılımının karakterizasyonu ve mineral yoğunluğunun ölçülmesi için mikro-CT'nin tahribatsız ölçüm için etkili olduğu ve yüksek çözünürlük sağladığı gösterilmiştir (Shahmoradi & Swain, 2016).. Mikro-CT tekniğinin adaptasyonun ve diş kompozit arayüzünün yorumlanmasında daha etkili olmakta ve polimerizasyonda kompozitle restore edilen kaviteden gerçek ve tahribatsız 3D veri elde edilebilmektedir (Chiang et al, 2010).

4. Mikro-CT Cihazının Avantajları ve Dezavantajları

Mikro-CT tarayıcıları, tıbbi CT tarayıcılarına benzer şekilde çalışır; her iki yöntem de ilgili objeyi ışınlamak için x-ışını tüpü kullanır. Tüpün karşısında ışığa duyarlı detektörler ve detektöre ulaşan verileri işleyecek bir yazılım, yazılım sonrası işleme teknikleri (örneğin, değiştirilmiş filtrelenmiş geri projeksiyon) uygulandıktan sonra yorumlanabilir 3D veri seti üreterek emilmeyen foton sinyallerini kaydeden bir sistemden oluşmaktadır (Hutchinson et al., 2017).

İki ana yapı tasarımı ilkesi mevcuttur. Birincisi (bazen “mini odaklı CT” olarak adlandırılır) x ışını algılama kaynağı ve detektörlerin incelenen objenin etrafında dönen bir gantry üzerine monte edildiği tıbbi CT tarayıcılarına benzer bir sistem mevcuttur. Bu sistemlerde, normalde çözünürlük yeteneklerini sınırlayan sabit bir “radyasyon kaynağı-detektör” mesafesi vardır (yaklaşık 50-100 mikron voksel aralığı). İkinci tasarımda (endüstriyel uygulamalar ve çoğu ex vivo örnek için kullanılır) radyasyon kaynağı sabittir ve ilgili objenin incelenmesi sırasında ayarlanabilir, dönen bir platforma monte edilir. Bunun avantajı, bunun “radyasyon kaynağı-obje” ve “obje-detektör” mesafesinin ayarlanmasına izin vermesi ve gelişmiş çözünürlük sağlamasıdır (1 mikrondan daha az voksel elde edilebilir). Yüksek güçlü histolojiyle karşılaştırılabilir çözünürlük, yeterli büyütme ile elde edilebilir. Ayrıca, yüksek çözünürlüklü episkopik mikroskopi ve episkopik floresan görüntü yakalama için gerekli olan objenin diseksiyonunu veya emek yoğun uygulamaları gerektirmeyen izotropik 3D veri setinin ek bir faydası da vardır (Hutchinson et al., 2017).

Radyografik görüntüleme teknikleri arasında, mikro-CT, çürük araştırmasında doğrulama yöntemi olarak geleneksel CT görüntülerinden daha umut vadeden bir alternatif olma potansiyeline sahiptir. Genel olarak, mikro-CT, tıbbi teşhislerde kullanılan iyi bilinen bilgisayarlı aksiyel tomografi yönteminin minyatürleştirilmiş bir versiyonudur, ancak mikrometre mertebesinde önemli ölçüde daha yüksek bir çözünürlükte çalışır. Eşlik eden yüksek radyasyon dozu, şu anda kullanımını laboratuvar çalışmalarıyla sınırlamaktadır (Boca et al., 2017; Davis & Wong, 1996; Elliott et al., 1994). Mikro-CT görüntüleme, daha fazla bilgisayar işlemi kullanılarak üç boyutlu görüntülere yeniden birleştirilebilen enine kesit dilimlerinin çıkarılmasına olanak tanır. Mineral kaybının derecesini görüntüleyerek, mikro-CT dolaylı bir demineralizasyon göstergesi olarak tarihsel CT kesitlerindeki renk değişikliklerinin yorumlanmasından daha objektif bir şekilde çürük lezyonunun gerçek kapsamının belirlenmesine olanak tanıyabilir (Boca et al., 2017; Kidd, Joyston-Bechal, & Beighton, 1993).

Klinik CT tarayıcıları genellikle 1 mm³ hacimli voksellerden oluşan görüntüler üretirken, 1980'li yıllarda geliştirilen ve 5-50 µm arasında vokseller üreten, x-ışını mikro-CT sistemleri çok daha iyi bir mekansal çözünürlüğe sahiptir (Swain & Xue, 2009). Mikro-CT'de örnek olarak, genellikle sabit bir x-ışını kaynağı ve x-ışını görüntüleme içeren bir sistemde, dikey bir eksen etrafında döndürülerek taranır (Sasov & Van Dyck, 1998).

Mikro-CT ile klinik CT cihazları arasında iki ana fark vardır. Birincisi; tıbbi CT'de x-ışını kaynak ve detektör sistemi hastanın etrafında döndürülür, bu da mekanik titreşim oluşmasına sebep olur. Ancak mikro-CT'de x-ışını kaynağı ve detektörü genellikle sabittir, obje ise kendi eksen etrafında döndürülür; böylece titreşim azalır ve daha iyi çözünürlük sağlanır. İkincisi; klinik çalışmalarda 1 mm olan x-ışını kaynak boyutu mikro-CT'de 5-10 µm'dir. Daha küçük kaynak yarı gölgeyi azaltır ve projeksiyon keskinliğini artırır. Objeyi x-ışını kaynağına yakın bir yere yerleştirip objenin başlangıçtaki büyütmesini artırmak mümkündür, bu da çözünürlüğü artıracaktır. Optik görüntüler kullanılarak gerçek büyütme sağlandığından çok küçük detaylar bile net görülebilir; bu durumda 1 µm'den daha küçük detaylara varan görüntü oluşturmak mümkün hale gelmektedir (Sasov & Van Dyck, 1998). Mikro-CT ve CT, geleneksel in vitro görüntüleme tekniklerine göre önemli avantajlara sahiptir. Geleneksel optik veya elektron mikroskobu ile bir obje üzerinden veya ince kesitlerinden alınan iki boyutlu görüntüler, üç boyutlu bir yapısal modele dönüştürülebilir (Lyroudia, Nikolaidis, Pitas, Zervas, & Palakidis, 1993). Ancak çoğu durumda, iki boyutlu bilgilere dayanarak üç boyutlu bir objenin orijinal yapısı hakkında bir sonuca varmak mümkün değildir. Ayrıca, bu yöntem hem zahmetli hem de zaman alıcıdır ve objenin enine kesitleri arasındaki mesafe bilgisinin kaybolması nedeniyle çok güvenilir değildir. Son zamanlarda, mikro-CT endodontik araştırmalarda umut vadeden bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Mikro-CT kullanılarak hacim ve yüzey alanı gibi temel parametreler ve yapı modeli indeksi (Structure Model Index-SMI) ve kanal şekli ile kalınlığı gibi ek tanımlayıcılar ölçülebilir (Swain & Xue, 2009). Ancak, mikro-CT ile taranıp üç boyutlu modelinin oluşturulmasının uzun sürmesi ve tekniğin pahalı olması, çalışmalarda örnek sayısının az olmasına yol açan bir dezavantajdır (Keleş & Alçın, 2015).

Mikro-CT'nin başlıca avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

Mikro-CT hem mineralize olmuş sert dokuların hem de yumuşak doku ve materyallerin görüntülenmesine imkan tanır (Şahin & Topuz, 2014; Yakıncı et al., 2016). En önemli avantajı kullanılan objelerin zarar görmemesi ve ölçümlerin tekrarlanabilmesidir (Erpaçal et al., 2019).

Karşılaştırmalı araştırmalarda mikro-CT kullanımı, mevcut tedavi tekniklerinin göreceli üstünlüğü ve en iyi uygulamaların ve klinik tedavi kılavuzlarının ortaya çıkışı hakkında da fikir verebilir. Ayrıca, tüm eğitim düzeylerindeki diş hekimliği öğrencileri için yeni eğitim yaklaşımları geliştirmeye yardımcı olabilir (Mirfendereski & Peters, 2012). Hayvan in vivo çalışmaları, mikro-CT görüntülemenin histolojik yöntemlerle karşılaştırılabilir sonuçlar üreten hızlı, tekrarlanabilir ve noninvaziv bir yöntem olduğunu göstermiştir (Grande et al., 2012).

Mikro-CT görüntüleme, incelenecek objeye fiziksel bir şekilde zarar vermez; bu, aynı objenin deneylerden önce veya sonra karşılaştırılmasına imkan tanıyan tekrarlı taramalarla mümkündür. Diğer yıkıcı yöntemler yerine bu yöntemi kullanırken, kullanılan objeyi elde etmenin zorluğu sorun değildir (Huysmans & Longbottom, 2004).

Mikro-CT teknolojisinde tarama ve yeniden yapılandırma nispeten uzun sürer ve bilgisayarda tecrübe gerektirir ve diğer yöntemlere kıyasla pahalıdır. Ayrıca, yüksek radyasyon dozları mikro-CT'nin kliniklerde kullanılmasını engellemektedir (Park, Bae, Chang, & Shon, 2011).

Ticari olarak temin edilebilen masaüstü XMT (x-ışını mikrotomografi) sistemleri, ışın sertleşmesi nedeniyle bilgi kaybıyla tarama yapan polikromatik x-ışını kaynakları kullanır. Projeksiyon alanındaki saçılmanın, objenin kesit görüntüsünün kenarında daha yüksek bir parlaklığa neden olması mümkündür (kupalama eserleri) (Mirfendereski & Peters, 2012).

Kaynaklar

- Badea, C. T. (2018). Small animal X-ray computed tomography. *Handbook of X-ray imaging: Physics and technology*.
- Çetinsoy, E., & Yazıcıoğlu, O. (2021). Dijital Teknolojinin Çürük Teşhisinde Kullanımı ve Başarısı. İstanbul Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı Başkanlığı, Bitirme Tezi, İstanbul.
- Bjørndal, L., Carlsen, O., Thuesen, G., Darvann, T., & Kreiborg, S. (1999). External and internal macromorphology in 3D-reconstructed maxillary molars using computerized X-ray microtomography. *International endodontic journal*, 32(1), 3-9.
- Blok, Y., Gravesteijn, F., Van Ruijven, L., & Koolstra, J. (2013). Micro-architecture and mineralization of the human alveolar bone obtained with microCT. *Archives of oral biology*, 58(6), 621-627.
- Boca, C., Truyen, B., Henin, L., Schulte, A. G., Stachniss, V., De Clerck, N., . . . Bottenberg, P. (2017). Comparison of micro-CT imaging and histology for approximal caries detection. *Scientific Reports*, 7(1), 6680.
- Bookstein, F. L. (1983). The geometry of craniofacial growth invariants. *American journal of orthodontics*, 83(3), 221-234.
- Cavanaugh, D., Johnson, E., Price, R. E., Kurie, J., Travis, E. L., & Cody, D. D. (2004). In vivo respiratory-gated micro-CT imaging in small-animal oncology models. *Molecular imaging*, 3(1), 15353500200403184.
- Chen, C.-Y., Hasselgren, G., Serman, N., Elkind, M. S., Desvarieux, M., & Engbretson, S. P. (2007). Prevalence and quality of endodontic treatment in the Northern Manhattan elderly. *Journal of Endodontics*, 33(3), 230-234.
- Chiang, Y.-C., Hickel, R., Lin, C.-P., & Kunzelmann, K.-H. (2010). Shrinkage vector determination of dental composite by μ CT images. *Composites Science and Technology*, 70(6), 989-994.
- Clementino-Luedemann, T. N. R., & Kunzelmann, K.-H. (2006). Mineral concentration of natural human teeth by a commercial micro-CT. *Dental materials journal*, 25(1), 113-119.
- Davis, G. R., & Wong, F. S. (1996). X-ray microtomography of bones and teeth. *Physiological measurement*, 17(3), 121.
- De Santis, R., Mollica, F., Prisco, D., Rengo, S., Ambrosio, L., & Nicolais, L. (2005). A 3D analysis of mechanically stressed dentin-adhesive-composite interfaces using X-ray micro-CT. *Biomaterials*, 26(3), 257-270.
- Dowker, S. E., Davis, G. R., & Elliott, J. C. (1997). X-ray microtomography: nondestructive three-dimensional imaging for in vitro endodontic studies. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 83(4), 510-516.

- Elliott, J., Anderson, P., Gao, X., Wong, F., Davis, G., & Dowker, S. (1994). Application of scanning microradiography and X-ray microtomography to studies of bones and teeth. *Journal of X-ray Science and Technology*, 4(2), 102-117.
- Elliott, J., Davis, G., & Dover, S. (2008). *X-ray microtomography: Past and present*. Paper presented at the Developments in X-Ray Tomography VI.
- Elliott, J., & Dover, S. (1984). Three-dimensional distribution of mineral in bone at a resolution of 15 μm determined by x-ray microtomography. *Metabolic Bone Disease and Related Research*, 5(5), 219-221.
- Er, F. (2013). Farklı Çürük Teşhis Yöntemlerinin Aproximal Çürüklerde İn Vitro Olarak Değerlendirilmesi. *Restoratif Diş Tedavisi Programı Doktora Tezi. Yakın Doğu Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü. Lefkoşa, KKTC.*
- Erpaçal, B., Adıgüzel, Ö., & Cangül, S. (2019). The use of micro-computed tomography in dental applications. *International Dental Research*, 9(2), 78-91.
- Feldkamp, L. A., Davis, L. C., & Kress, J. W. (1984). Practical cone-beam algorithm. *Josa a*, 1(6), 612-619.
- Gambill, J. M., Alder, M., & del Rio, C. E. (1996). Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. *Journal of Endodontics*, 22(7), 369-375.
- Göktürk, H., Ozkocak, I., Buyukgebiz, F., & Demir, O. (2018). Effectiveness of various irrigation protocols in removing calcium hydroxide from root canals.
- Görgeç, V. A., Güler, Ç., & Kızılcı, E. (2014). Diş Hekimliğinde Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi CBCT. *Annals of Health Sciences Research*, 3(2), 36-40.
- Grande, N. M., Plotino, G., Gambarini, G., Testarelli, L., D'Ambrosio, F., Pecci, R., & Bedini, R. (2012). Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 48, 26-34.
- Gu, Y.-c., Zhang, Y.-p., Liao, Z.-g., & Fei, X.-d. (2013). A micro-computed tomographic analysis of wall thickness of C-shaped canals in mandibular first premolars. *Journal of Endodontics*, 39(8), 973-976.
- Hajeer, M. Y., Millett, D., Ayoub, A., & Siebert, J. (2004). Applications of 3D imaging in orthodontics: part I. *Journal of orthodontics*, 31(1), 62-70.
- Harrel, S. K., & Nunn, M. E. (2001). The effect of occlusal discrepancies on periodontitis. II. Relationship of occlusal treatment to the progression of periodontal disease. *Journal of Periodontology*, 72(4), 495-505.
- Hutchinson, J. C., Shelmerdine, S. C., Simcock, I. C., Sebire, N. J., & Arthurs, O. J. (2017). Early clinical applications for imaging at microscopic deta-

- il: microfocus computed tomography (micro-CT). *The British journal of radiology*, 90(1075), 20170113.
- Huysmans, M.-C., & Longbottom, C. (2004). The challenges of validating diagnostic methods and selecting appropriate gold standards. *Journal of dental research*, 83(1_suppl), 48-52.
- Iglauer, S., & Lebedev, M. (2018). High pressure-elevated temperature x-ray micro-computed tomography for subsurface applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 256, 393-410.
- Iric, M. S., Rabelo, G. D., Spin-Neto, R., Dechichi, P., Borges, J. S., & Soares, P. B. F. (2018). Use of micro-computed tomography for bone evaluation in dentistry. *Brazilian dental journal*, 29(3), 227-238.
- Kachelrieß, M. (2008). Micro-ct. *Molecular Imaging I*, 23-52.
- Kamburoğlu, K., Kurt, H., Kolsuz, E., Öztaş, B., Tatar, I., & Çelik, H. H. (2011). Occlusal caries depth measurements obtained by five different imaging modalities. *Journal of digital imaging*, 24, 804-813.
- Keles, A., Ahmetoglu, F., & Uzun, I. (2014). Quality of different gutta-percha techniques when filling experimental internal resorptive cavities: A micro-computed tomography study. *Australian Endodontic Journal*, 40(3), 131-135.
- Keleş, A., & Alçın, H. (2015). Mikro Bilgisayarlı Tomografi ve Endodontik Araştırmalardaki Yeri. *Türkiye Klinikleri Journal of Endodontics*, 1, 32-39.
- Kidd, E., Joyston-Bechal, S., & Beighton, D. (1993). Microbiological validation of assessments of caries activity during cavity preparation. *Caries Research*, 27(5), 402-408.
- Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., & Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: a state of the art review. *International journal of food microbiology*, 144(1), 51-63.
- Kuhn, J., Goldstein, S., Feldkamp, L., Goulet, R., & Jesion, G. (1990). Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure. *Journal of orthopaedic research*, 8(6), 833-842.
- KURT, M. H., & ORHAN, K. (2016). Dış hekimliğinde mikro-bilgisayarlı tomografi kullanımı. *Türkiye Klinikleri Oral and Maxillofacial Radiology-Special Topics*, 2(1), 14-21.
- Lyroudia, K., Nikolaidis, N., Pitas, I., Zervas, P., & Palakidis, K. (1993). Computerized three-dimensional reconstruction: A method to study pulpal vessels and nerves. *Journal of Endodontics*, 19(12), 604-608. doi:[https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(06\)80274-8](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(06)80274-8)
- Marciano, M., Duarte, M., Ordinola-Zapata, R., Del Carpio-Perochena, A., Cavenago, B., Villas-Bôas, M., . . . Moraes, I. (2012). Applications of micro-computed tomography in endodontic research. *Current microscopy*

- contributions to advances in science and technology. Badajoz, Spain: Formatex research center, p782-788.*
- Mena Laura, E. E., Cestari, T. M., Almeida, R., Pereira, D. S., Taga, R., Garlet, G. P., & Assis, G. F. (2019). Metformin as an add-on to insulin improves periodontal response during orthodontic tooth movement in type 1 diabetic rats. *Journal of Periodontology, 90*(8), 920-931.
- Mirfendereski, M., & Peters, O. (2012). Micro-Computed Tomography in Endodontic Research. *Endodontic Radiology, 278-284.*
- Mulder, L., Koolstra, J. H., de Jonge, H. W., & van Eijden, T. M. (2006). Architecture and mineralization of developing cortical and trabecular bone of the mandible. *Anatomy and embryology, 211*, 71-78.
- Müller, R., & Rüeegsegger, P. (1997). Micro-tomographic imaging for the non-destructive evaluation of trabecular bone architecture. *Bone research in biomechanics, 61-79.*
- Nur, S., Şahmaran, T., Serindere, G. (2021). Diş Hekimliğinde İntrooral Radyografi Teknikleri, Sağlık Bilimleri Güncel Araştırmalar ve Yeni Eğilimler-3, İvpe yayın evi, Cetinje, Montenegro, 356-368.
- Nur, S. and Şahmaran, T. (2022). Dental Volumetrik Tomografi-Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi, Editör : Doç.Dr. Dilek Atik, Sağlık Bilimlerinde Yeni Trendler-III, Duvar yayın evi, Yeni Mahalle, Ankara, 279-295.
- Oi, T., Saka, H., & Ide, Y. (2004). Three-dimensional observation of pulp cavities in the maxillary first premolar tooth using micro-CT. *International endodontic journal, 37*(1), 46-51.
- Orhan, K. (2020). *Micro-computed Tomography (micro-CT) in Medicine and Engineering*. Retrieved from
- Paqué, F., Boessler, C., & Zehnder, M. (2011). Accumulated hard tissue debris levels in mesial roots of mandibular molars after sequential irrigation steps. *International endodontic journal, 44*(2), 148-153.
- Paqué, F., Rechenberg, D.-K., & Zehnder, M. (2012). Reduction of hard-tissue debris accumulation during rotary root canal instrumentation by etidronic acid in a sodium hypochlorite irrigant. *Journal of Endodontics, 38*(5), 692-695.
- Park, Y.-S., Bae, K.-H., Chang, J., & Shon, W.-J. (2011). Theory of X-ray microcomputed tomography in dental research: application for the caries research. *Journal of Korean Academy of Conservative Dentistry, 36*(2), 98-107.
- Rabelo, G. D., Coutinho-Camillo, C., Kowalski, L. P., Portero-Muzy, N., Roux, J.-P., Chavassieux, P., & Alves, F. A. (2018). Evaluation of cortical mandibular bone in patients with oral squamous cell carcinoma. *Clinical oral investigations, 22*, 783-790.

- Rhodes, J., Ford, T. P., Lynch, J., Liepins, P., & Curtis, R. (1999). Micro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *International endodontic journal*, 32(3), 165-170.
- Ritman, E. L. (2004). Micro-Computed Tomography—Current Status and Developments. *Annual review of biomedical engineering*, 6(Volume 6, 2004), 185-208. doi:https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140130
- Ritman, E. L. (2011). Current status of developments and applications of micro-CT. *Annual review of biomedical engineering*, 13(1), 531-552.
- Roggendorf, M., Legner, M., Ebert, J., Fillery, E., Frankenberger, R., & Friedman, S. (2010). Micro-CT evaluation of residual material in canals filled with Activ GP or GuttaFlow following removal with NiTi instruments. *International endodontic journal*, 43(3), 200-209.
- Rossi-Fedele, G., & Ahmed, H. M. A. (2017). Assessment of root canal filling removal effectiveness using micro-computed tomography: a systematic review. *Journal of Endodontics*, 43(4), 520-526.
- Sasov, A., & Van Dyck, D. (1998). Desktop X-ray microscopy and microtomography. *J Microsc*, 191(Pt 2), 151-158.
- Schambach, S. J., Bag, S., Schilling, L., Groden, C., & Brockmann, M. A. (2010). Application of micro-CT in small animal imaging. *Methods*, 50(1), 2-13.
- Schwass, D., Swain, M., Purton, D., & Leichter, J. (2009). A system of calibrating microtomography for use in caries research. *Caries Research*, 43(4), 314-321.
- Shahmoradi, M., & Swain, M. V. (2016). Quantitative characterization and micro-CT mineral mapping of natural fissural enamel lesions. *Journal of dentistry*, 46, 23-29.
- Sharma, K. S., Gong, H., Ghasemalizadeh, O., Yu, H., Wang, G., & Cao, G. (2014). Interior micro-CT with an offset detector. *Med Phys*, 41(6Part1), 061915.
- Smith, N. B., & Webb, A. (2010). *Introduction to medical imaging: physics, engineering and clinical applications*: Cambridge university press.
- Spoor, C. F., Zonneveld, F. W., & Macho, G. A. (1993). Linear measurements of cortical bone and dental enamel by computed tomography: applications and problems. *American journal of physical anthropology*, 91(4), 469-484.
- Swain, M. V., & Xue, J. (2009). State of the Art of Micro-CT Applications in Dental Research. *International Journal of Oral Science*, 1(4), 177-188. doi:10.4248/IJOS09031
- Şahin, F. Ü., & Topuz, Ö. (2014). Diş hekimliği araştırmalarında mikrobilgisayarlı tomografi uygulamaları. *Acta Odontologica Turcica*, 31(2), 114-120.

- Vannier, M. W., Hildebolt, C. F., Conover, G., Knapp, R. H., Yokoyama-Crothers, N., & Wang, G. (1997). Three-dimensional dental imaging by spiral CT: A progress report. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 84(5), 561-570.
- Verdonschot, N., Fennis, W. M., Kuijs, R. H., Stolk, J., Kreulen, C. M., & Creugers, N. H. (2001). Generation of 3-D finite element models of restored human teeth using micro-CT techniques. *International Journal of Prosthodontics*, 14(4).
- Vier-Pelisser, F. V., Dummer, P. M., Bryant, S., Marca, C., Só, M. V. R., & Figueiredo, J. A. P. d. (2010). The anatomy of the root canal system of three-rooted maxillary premolars analysed using high-resolution computed tomography. *International endodontic journal*, 43(12), 1122-1131.
- Wang, C., Cao, L., Yang, C., & Fan, Y. (2018). A Novel Method to Quantify Longitudinal Orthodontic Bone Changes with In Vivo Micro-CT Data. *Journal of healthcare engineering*, 2018(1), 1651097.
- Yakıncı, M., Onar, K., Depci, T., Orhan, K., & Turan, C. (2016). Importance of micro-computed tomography (Micro-CT) in health, science and engineering sciences. *J Biomed Clin Eng*, 81, 334-336.
- Yeri, E. A. (2015). Mikro bilgisayarlı tomografi ve endodontik araştırmalardaki yeri. *Türkiye Klinikleri J Endod-Special Topics*, 1(3), 32-39.