



## BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ İLE ÜÇ BOYUTLU (3B) TARAMA

**Hasan Kemal SÜRMEN<sup>1,a,\*</sup>**

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü  
<sup>a</sup>hksurmen@iuc.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8045-9193

### ÖZET

Bilgisayarlı tomografi, x-ışınlarından faydalanılarak bir yapının iç ve dış geometrik verisinin detaylı bir şekilde elde edilebildiği bir tarama teknolojisidir. Bu teknoloji, tıp alanında hastalıkların teşhisinde görüntüleme aracı olarak kullanıldığı gibi elde edilen kesit görüntüleri çeşitli yazılımlar yardımıyla 3B modellere dönüştürülebilmektedir. Bilgisayarlı tomografinin sağladığı ayrıcalıklar ve yöntemin tıp alanının dışındaki endüstriyel alanlarda tersine mühendislik, tahribatsız muayene gibi uygulamalar için de elverişli olması bu tarama teknolojisine ilgiyi daha da artırmıştır. Bu çalışmada bilgisayarlı tomografinin prensipleri, kullanılan yöntemler, ilgili terimler, parametreler ve birimler, bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları ve gelişimi, endüstriyel bilgisayarlı tomografi ve son yıllarda yapılan akademik çalışmalara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayarlı tomografi, 3B tarama, DICOM, artefakt, Hounsfield ölçeği.

### ABSTRACT

Computed tomography is a scanning technology with which it is possible to obtain detailed internal and external geometric data of a structure by using x-rays. This technology is used as an imaging tool in the diagnosis of diseases in the field of medicine, and the obtained cross-section images can be converted into 3D models with the help of various software. The privileges provided by computed tomography and also its convenience for applications such as reverse engineering and non-destructive testing in industrial areas outside the medical field have increased the popularity of this scanning technology. This study includes principles of computed tomography, methods used, related terms, parameters and units, generations and development of computed tomography machines, industrial computed tomography, and recent academic studies.

**Keywords:** Computed tomography, 3D scanning, DICOM, artifact, Hounsfield unit.

**\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

**Atıf (Citation):** Sürmen, H.K., "Bilgisayarlı Tomografi İle Üç Boyutlu (3B) Tarama", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(2): 1-21, 2022.

**Geliş (Received):** 17/07/2022

**Kabul (Accepted):** 12/11/2022

**Yayın (Published):** 31/12/2022

## 1. GİRİŞ

Bilgisayarlı tomografi (BT), x-ışınlarının kullanılarak taranan obje boyunca kesit görüntülerin oluşturulduğu ve böylece bir yapının iç ve dış geometrik verisinin detaylı bir şekilde elde edilebildiği bir tarama teknolojisidir. Bu teknolojiyle taranan yapılar, bir organ, insan vücudunda bir bölge olabileceği gibi endüstriyel bir obje, doğada bulunan jeolojik veya organik bir yapı da olabilir.

Uluslararası literatürde “computed tomography (CT)”[1] olarak bilinen bilgisayarlı tomografi bazı kaynaklarda "computerized tomography" [2] veya "computed axial tomography (CAT)" [3] olarak da geçmektedir. "Tomografi" kelimesi Yunanca dilim anlamına gelen “tomos” ve yazmak anlamına gelen “grafein” kelimelerinden türetilmiştir. Bilgisayarlı tomografi ile yapılan taramalar sonucunda iki boyutlu (2B) dilim şeklinde kesit görüntüler elde edilir ve bu 2B veriler bilgisayar yazılımları aracılığı ile birleştirilerek taranan yapının üç boyutlu (3B) dijital, hacimsel verisi elde edilebilmektedir.

Tarihi 1900’lü yılların başlarına dayanan bilgisayarlı tomografi teknolojisi geliştirilerek 1972’de halka duyurulmuş olup [4, 5] dünya üzerinde hızla yaygınlaşarak başta tıp alanında olmak üzere endüstriyel alanlarda da muayene, ölçüm, 3B modelleme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Başlangıçta tıbbi görüntüleme aracı olarak kullanılan BT 1980’lerden sonra endüstriyel parçaların analizlerinde, tahribatsız testlerde ve malzeme kusurlarının belirlenmesinde giderek popülerleşmiştir. BT teknolojisi 2000’lerden sonra metroloji alanına girerek 3B optik koordinat ölçümleme sistemlerine [6] alternatif olmuştur.

Yapıların iç kısımlarının da görüntülenmesine olanak veren bilgisayarlı tomografi, optik [7], lazer [8] ve fotogrametri [9] gibi diğer 3B tarama yöntemlerinden farklılık gösterir. BT daha çok manyetik rezonans görüntülemeye (MRG) (magnetic resonance imaging -MRI) [10] benzerdir ancak MRG hidrojen moleküllerinin manyetik rezonansını belirlemek için iyonize olmayan radyo frekanslarını kullanır. BT ise iyonize radyasyon kullanarak x-ışınlarının emilimini ölçer. Bu nedenle MRG ve BT’nin kullanım alanlarında farklılıklar görülebilmektedir.

Bilgisayarlı tomografi yöntemi günümüzde sadece teşhis amaçlı olarak değil, özellikle biyomekanik ve bir çok tıbbi araştırmada uygulama yapılan bölgenin üç boyutlu modelinin elde edilmesinde etkin bir 3B tarama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Hem tıbbi bilgisayarlı tomografi hem de endüstriyel bilgisayarlı tomografi ile 3B tarama, başta tıp [11, 12],

biyomekanik [13, 14] dijital otopsi [15], derin öğrenme [16, 17], jeoloji [18] ve çeşitli mühendislik alanları [19, 20] olmak üzere gün geçtikçe daha da yaygınlaşmaktadır. Ayrıca BT'nin daha küçük ölçekli kullanımı için geliştirilen mikro-BT ( $\mu$ CT) ile paleontoloji, entomoloji [21], dişçilik [22] gibi alanlarda yüksek çözünürlüklü tarama özelliği sayesinde küçük parçalar tahribatsız bir şekilde taranabilmektedir. Bu çalışmada bilgisayarlı tomografinin prensipleri, kullanılan yöntemler, ilgili terimler, parametreler ve birimler, bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları ve gelişimi, endüstriyel bilgisayarlı tomografi, son yıllarda yapılan akademik alandaki tıbbi ve endüstriyel uygulamalara yer verilerek bir derleme yapılmıştır.

## 2. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ (BT)

Bütün x-ışını görüntüleme sistemleri, x-ışınlarının uygulandığı yapı tarafından absorbe edilmesi ve absorbe edilen miktara bağlı olarak görüntünün oluşturulması prensibine dayanır. Tıbbi alanda kullanılan konvansiyonel x-ışını görüntüleme teknolojileri de bu prensibe dayanarak, akciğer, kalp, kas gibi farklı dokularda emilen ve geçen x-ışını miktarına bağlı olarak hastanın vücudundaki dokuların iki boyutlu bir projeksiyon görüntüsünü sağlar. X-ışını ile üretilen bu fotoğrafa radyografi denir.

Bilgisayarlı tomografi de x-ışını görüntüleme prensibine göre çalışır ve taranan hacim boyunca kesit görüntüleri sunar. BT temel olarak verinin toplanması, rekonstrüksiyonu, görüntülenmesi ve saklanması proseslerini içerir. BT ile elde edilen veride milyonlarca noktasal veri bulunabilir. Bu verilerden bilgisayar yardımıyla bir rekonstrüksiyon algoritması kullanılarak kesit görünüş elde edilir. Taranan bölge için alınan farklı kesit görüntüleri birleştirilir böylece kemik, damar, yumuşak doku gibi farklı yapılardan oluşan bölgenin ayrıntılı bir 3B modeli elde edilmiş olur.

### 2.1. Terimler, Parametreler ve Birimler

Bu bölümde bilgisayarlı tomografi ile tarama uygulamaları yapılırken karşımıza çıkan bazı terim, parametre ve kullanılan birimlere yer verilmiştir.

DICOM, tıpta dijital görüntüleme ve iletişim (Digital Imaging and Communications in Medicine - DICOM) olarak ifade edilen, tıbbi görüntüleme cihazlarından elde edilen verilerin saklanması ve görüntülenmesinde kullanılmak amacıyla geliştirilmiş olan bir dijital veri formatı standardıdır. BT makinesi aracılığıyla elde edilen DICOM verileri yalnızca 2B

görüntüler içerir. Bu verilerin bir biyomodel, implant üretimi veya bilgisayarda mekanik simülasyonlar için kullanılabilmesi için önce bir CAD modeline dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla, çeşitli tescilli (MIMICS, Materialise, Belçika; Geomagic Freeform, 3D Systems, ABD; Simpleware, Synopsys, ABD; 3D Doctor, Able Software Corps, ABD) ve açık kaynak (DeVIDE, Visualization Group; InVesalius, Brezilya; Osirix, İsviçre) yazılımlar mevcuttur.

Segmentasyon, bölgelerin ayrıştırılması olarak bilinir. Segmentasyonda bir bölge ile diğeri arasındaki sınırın doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bu sınırlar yoğunluk farklılıklarına göre ayırt edilir. Farklı yapıların benzer yoğunluğa sahip olduğu durumlarda, bunları basitçe hacim oluşturma parametrelerini ayarlayarak ayırmak mümkün olmayabilir. Bu tip durumlarda istenmeyen yapıları görüntüden kaldırabilen manuel veya otomatik segmentasyon prosedürleri kullanılır.

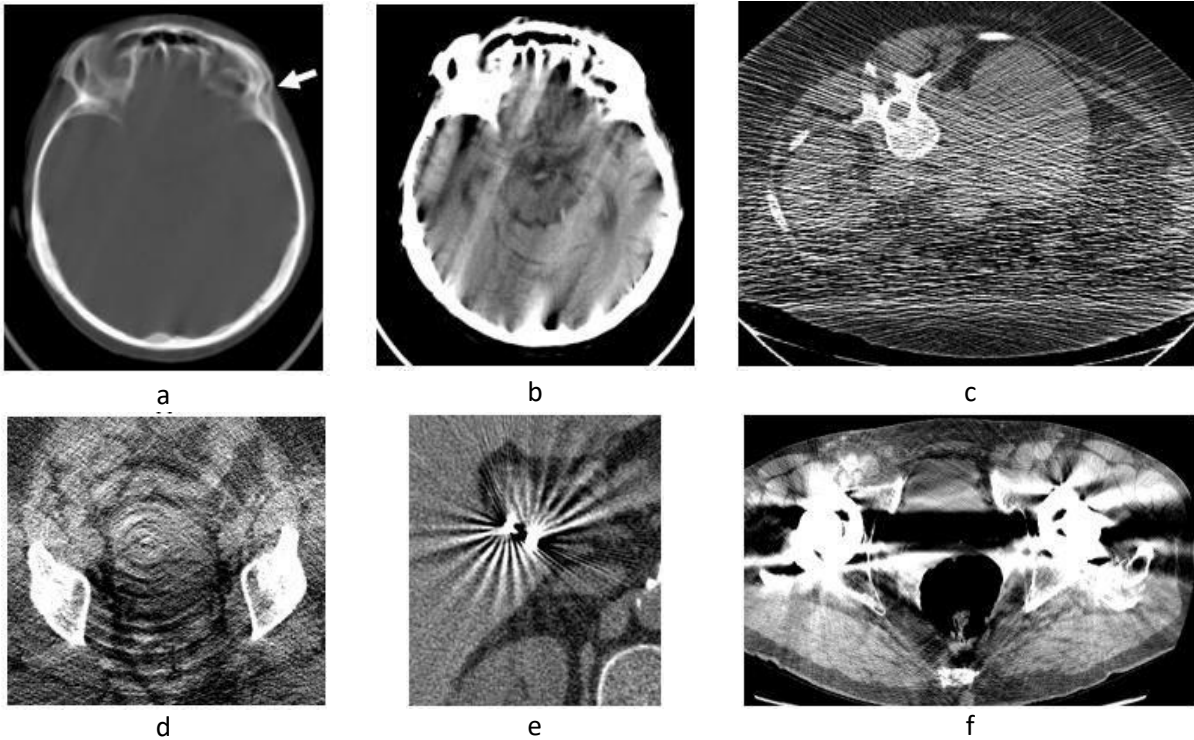
Attenüasyon veya atenuasyon, x-ışını demetinin taranan bölgeden geçerken absorpsiyon veya sapma sonucu şiddetinde meydana gelen azalma olarak tanımlanır.

Artefakt, normalde var olmayan; ancak çeşitli etkenlerden dolayı görüntüye yansıyan şekillerdir. Artefakt cihazdan, taranan objenin veya hastanın hareketinden veya uygulama hatasından kaynaklanabilir. Artefaktlar çeşitli şekillerde kendini belli ederler [23] (Şekil 1).

- Çizgiler (Streaks): Bu artefaktlar keskin köşelerden uzağa yayılan koyu çizgiler şeklinde görünür. Tarayıcının, genellikle metalik olan nesnenin yeterli projeksiyonunu alamamasından kaynaklanır. Ayrıca yetersiz bir mA seçildiğinde ve x-ışınının penetrasyonu yetersiz olduğunda da ortaya çıkabilir. Bu artefaktlar aynı zamanda tarama sırasındaki hareketle de bağlantılıdır.
- Kısmi Hacim Etkisi (Partial Volume Effect) : Bu artefakt keskin kenarlarda 'bulanıklık' olarak kendini gösterir. Nedeni, tarayıcının üst üste gelen yapıları ayırt edememesidir. Bu durum daha ince dilimli taramalarla kısmen aşılabılır.
- Yüzük Artefaktı (Ring Artifact): En yaygın mekanik artefaktlardan biridir. Bir veya daha fazla halka şeklinde yapının bir görüntü içinde belirmesiyle oluşur. Bunun nedeni bir dedektör hatasıdır.
- Gürültü Artefaktı (Noise Artifact): Bu artefakt, genellikle dilim kalınlığının ince seçildiği uygulamalarda daha yaygın olarak ortaya çıkar. Ayrıca kV veya mA çok düşük olduğunda da oluşabilir.

- Hareket Artefaktı (Motion Artifact): Bu artefakt, hasta veya taranan objenin hareketinden kaynaklanan bulanıklık olarak görülür. Bu sorun, çoklu dedektörlü BT (MDCT) cihazlarının kullanılmasıyla daha hızlı tarama süreleri ile aşılabilmektedir.
- Yel değirmeni (Windmill): Dedektörler yeniden yapılandırma düzlemiyle kesiştiğinde çizgili görünüm meydana gelebilir. Bu, filtrelerle veya pitch değerini düşürerek azaltılabilir.
- Işın Sertleştirilmesi (Beam Hardening): Nesnenin merkezinde kenardan daha fazla atenuasyon olduğunda oluşur. Dedektöre ulaşan fotonlar fincan (cupping) ve koyu renkli çizgiler şeklinde artefaktlar oluşturabilir.

BT artefaktlarının MBIR (Model-Based Iterative Reconstruction) [24, 25] ve MDT (Metal Deletion Technique) [26] gibi çeşitli tekniklerle azaltılabildiği görülmüştür. Böylece daha düşük dozda iyi görüntüler elde edebilmek mümkün olmaktadır.



**Şekil 1.** a) Hareketten kaynaklanan bulanıklık, b) hareketten kaynaklanan çizgili görüntü, c) düşük dozlu BT görüntüsünden kaynaklı gürültü, d) yüzük artefaktları, e) dalgali çizgilerden oluşan yel değirmeni artefaktı, f) koyu çizgili ışın sertleşmesi artefaktı [23].

BT taramalarda karşımıza çıkan FOV ifadesi “Field Of View” ‘in baş harflarından oluşur, görüntü alanını belirtir.

Pixel, "picture" ve “element" kelimelerinden türetilmiş 2B dijital görüntülerde kontrol edilebilir en küçük birimdir.

Voxel, “volume” ve “element” kelimelerinden türetilmiş 3B dijital görüntülerde kontrol edilebilir en küçük üç boyutlu hacimsel birimdir.

Gürültü (noise), bilgisayarlı tomografide görüntü kalitesini azaltan, istenmeyen bir oluşumdur. Gürültüyü optik yoğunlukta dalgalanma olarak da tanımlayabiliriz [27]. Genelde düşük dozlu taramalarda oluşur.

Dansite, bilgisayarlı tomografide x-ışını geçirgenliğini belirtmek için kullanılan yoğunluk anlamına gelen terimdir. Taranan nesne veya doku x-ışınlarını ne kadar az geçirirse, görüntüsü o kadar yoğun olur.

Hiperdens, BT taramada beyaz görünen alanlara denir. Örneğin kemikler x-ışınını daha az geçirdiği için görüntüler yüksek yoğunlukta (hiperdens), beyaz renkli görünür.

Hipodens, BT taramada siyah görünen alanlara denir. Örneğin akciğerler x-ışınını daha çok geçirdiği için görüntüler düşük yoğunlukta (hipodens), siyah renkli görünür.

CTDI yani BT doz indeksi (Computed Tomography Dose Index), bir BT tarayıcısının radyasyon dozu çıktısının standart ölçüsüdür. Ölçü birimi mGy'dir. Kullanıcının farklı BT tarayıcılarının radyasyon çıktısını karşılaştırmasını sağlar. Geçmişte CTDI<sub>100</sub> (100 mm uzunluğunda bir iyonizasyon odası üzerinden ölçülmüştür) ve CTDI<sub>w</sub> (tek bir dilim boyunca ağırlıklı ortalama doz) kullanılmıştır. Mevcut kullanımdaki sarmal tarayıcılar için, CTDI<sub>vol</sub> hacimsel bilgisayarlı tomografi doz indeksi (Volume Computed Tomography Dose Index) daha yaygın olarak kullanılır. Bu endeks BT tarayıcısından çıkan radyasyon çıktısının en önemli ölçülerinden biridir.

DLP, doz-uzunluk çapımı (Dose-Length Product) olarak bilinen değer CTDI<sub>vol</sub> ile tarama uzunluğunun (L) çarpımıdır. DLP birimi mGy-cm'dir.

Tüp gerilimi (kV), x-ışını enerjisini belirtir. Radyasyon dozu, tüp voltajının karesi ile doğru orantılıdır. Klinik uygulamalarda genellikle 70-140 arası kV kullanılır [28].

Tüp akımı (mA), tüpten üretilen x ışını miktarıyla bağlantılıdır. Gantri (gantry) dönme süresi ile çarpımı tüp akımı ışınlama süresini (mAs) verir [28]. Tüp akımı azaltıldığında radyasyon dozu da doğrusal bir şekilde azalır.

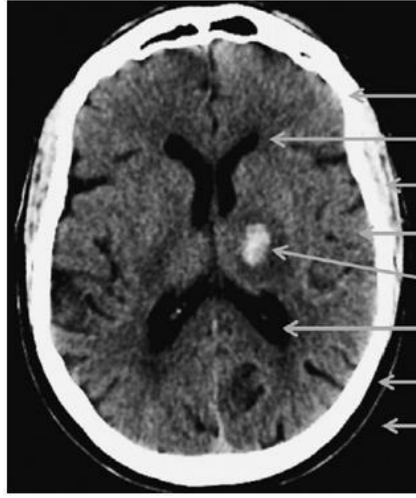
CTA, bilgisayarlı tomografi anjiyografi (Computed Tomography Angiography) olarak bilinen özellikle arterler, damarlar ve kalp odaları için kan damarlarındaki lümen veya kan akışını incelemek için kullanılan özel bir radyografi prosedürüdür. Yöntemde kan damarlarına bir kontrast madde enjeksiyonu gerçekleştirilir. CTA, kan damarı hastalıklarının ve yaralanma, anevrizma, tıkanıklık gibi durumların teşhis edilmesine ve değerlendirilmesine yardımcı olur.

HU yani Hounsfield ölçeği (Hounsfield Unit), BT görüntülerinin yorumlanmasında radyologlar tarafından kullanılan radyo yoğunluğunun nicel bir ölçüsüdür. Örneğin, 120-140 kV rutin BT X-ışını enerjilerinde, havanın HU değeri yaklaşık -1000, suyun 0 ve yoğun kemiğin HU değeri yaklaşık +1000'dir. X-ışını absorpsiyonunun daha fazla olduğu daha yoğun dokular, pozitif değerlere sahiptir ve parlak görünürler; daha az x-ışını absorpsiyonun daha az yoğun olduğu dokular negatif değerlere sahiptir ve koyu görünürler (Şekil 2).



Şekil 2. Doku yoğunluğu haritası.

Suyun üzerinde yüzen yağlar -30 HU ile -70 HU aralığındadırlar. Yağ dokusu ve hava skalanın negatif yönünde, yumuşak dokular, kan ve kemik skalanın pozitif yönünde yer alır [29] (Şekil 3). BT tarama tıp alanının dışında, endüstride de kullanılmaktadır. Biyolojik dokulardan daha yoğun parçalar tarandığında HU değerinin arttığı, genel olarak HU değerinin -1000 ile +4000 arasında değiştiği söylenebilir [19]. Örneğin çelik veya gümüş gibi metaller için HU değeri 3000'den fazla olabilir. Modjtahedi ve ark. [30] yaptıkları bilgisayarlı tomografi taraması çalışmasında pirinç, bakır, gümüş, çelik ve kurşun için HU değerini 3000 ile 3.100 HU arasında ölçmüşlerdir. Alüminyum için ise daha düşük bir değer (714-815 HU) elde etmişlerdir.



- Kemik : +1000 HU
- Beyaz madde : +20 HU ile +30 HU arası
- Kas : +20 HU ile +40 HU arası
- Gri madde : +30 HU ile +40 arası
- Kanama : +65 HU ile +95 HU arası
- CSF (beyin omurilik sıvısı) : 0 HU
- Yağ : -30 HU ile -70 HU arası
- Hava : -1000 HU

Şekil 3. Çeşitli dokular için HU değerleri.

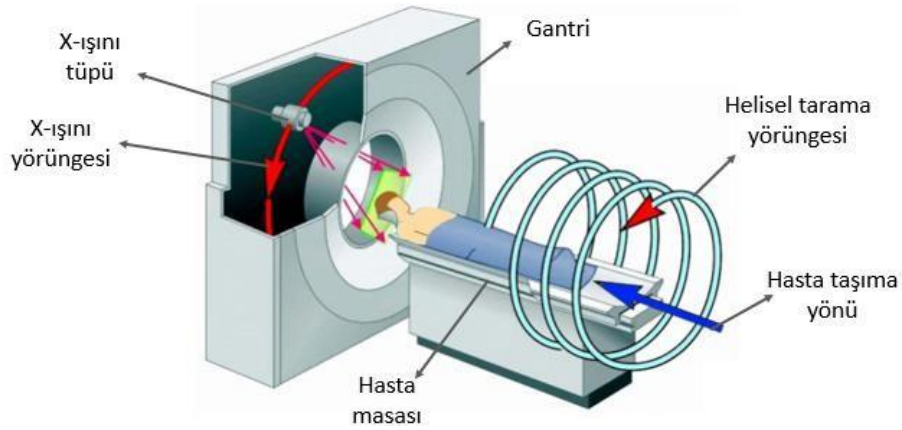
Gray (Gy), maddenin birim kütlesi başına absorbe edilen iyonlaştırıcı enerjinin ölçüsüdür ve kilogram başına joule olarak ölçülür.

Sievert (Sv), canlı bir dokunun maruz kaldığı radyasyonun etkisini ifade eden dozun SI sistemindeki birimidir. CSG birim sisteminde kullanılan karşılığı ise REM (rontgen equivalent man) olarak bilinir. 1 Sv, 100 REM'e eşittir. Gy ve Sv genellikle miliGray (mGy) ve miliSievert mSv olarak kullanılır.

### 3. BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ MAKİNELERİNİN JENERASYONLARI VE GELİŞİMİ

Gün geçtikçe daha hızlı gantrilerin üretilmesi ve daha yüksek güç uygulanabilmesi üçüncü nesil BT makinelerini tekrar gündeme getirmiştir. Bu makinelerin özellikleri geliştirilerek ve yeni bazı özellikler eklenerek farklı versiyonları günümüzde birçok alanda tercih edilmektedir. Günümüzde yaygın olarak tercih edilen helisel (spiral) BT makinelerinde masa, tüple beraber harekete geçerek gantri içinde ilerlerken kısa sürede birçok BT görüntüsü elde edilebilmektedir (Şekil 4). Bu makineler tek tek dilimlerin bir dizi fotoğrafını çekmek yerine sarmal (veya spiral) biçimde sürekli fotoğraflar çeker. Helisel BT, eski BT tekniklerine göre daha hızlıdır, vücut içindeki alanların daha kaliteli 3B resimlerini üretir ve küçük anomalileri daha iyi tespit edebilir.



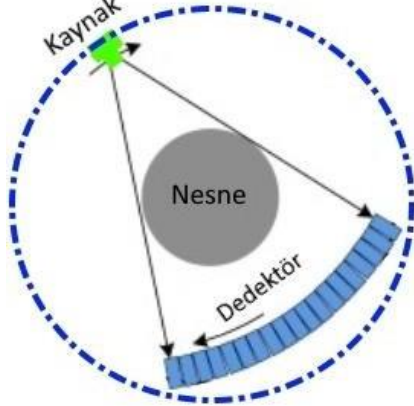
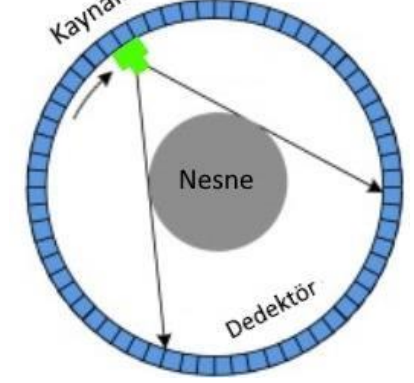
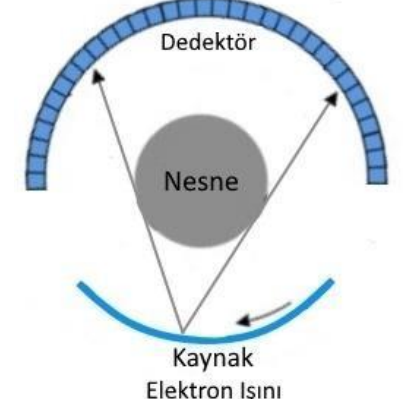


Şekil 4. Helisel (spiral) bilgisayarlı tomografi makinesi

Modern BT makinelerinin gelişimine kadar beş jenerasyon geçmiştir. Her bir jenerasyon ile bir öncekine göre bazı teknolojik yenilikler getirilmiş böylece daha hızlı ve detaylı taramaların yapılması amaçlanmıştır. Tablo 1’de zaman içinde geliştirilmiş olan BT makinelerinin 5 farklı jenerasyonu gösterilmektedir.

Tablo 1. Bilgisayarlı tomografi makinelerinin jenerasyonları.

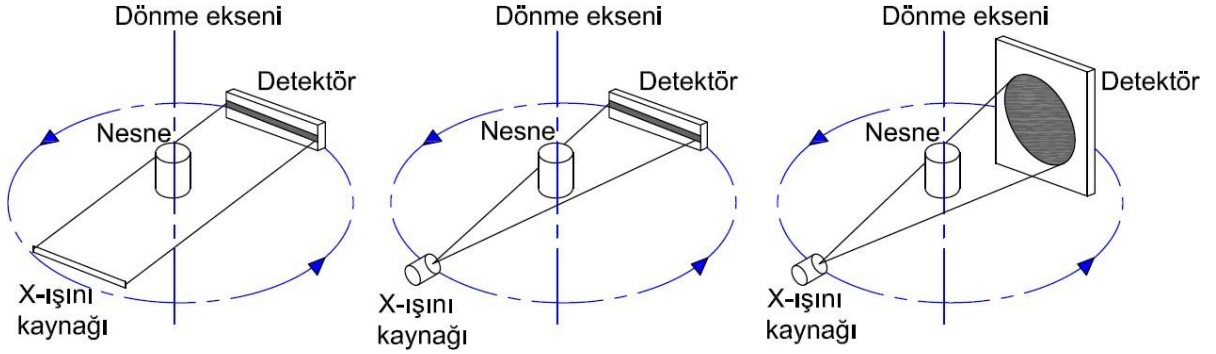
<b>1. Jenerasyon BT</b>	<p>İlk geliştirilen BT makinesinde obje taranırken kendi eksenini etrafında dönmektedir. Ancak hasta taramaları için bu uygun olmadığından dolayı x-ışını kaynağı ve dedektör hasta etrafında dönecek şekilde bir düzenleme yapılmıştır. X-ışını tüpü kalem şeklinde x-ışını üretmektedir. Birinci nesil BT makinelerinde bir dedektör ve bir x-ışını kaynağı kullanıldığı için ışın bir defa gönderildiğinde bir aksel görüntü elde edilebilmektedir. Her bir kesit görüntüsü için X-ışını kaynağı ve dedektör birçok defa beraber bir yön boyunca hareket edip veriyi topladıktan sonra hastaya göre döndürülmektedir. Bu tarama şekli çok zaman almaktadır. Ortalama bir tarama süresi 25-30 dakika civarındadır.</p>	
<b>2. Jenerasyon BT</b>	<p>İkinci nesil BT makinelerinde yelpaze ışın tipi kullanılmaya başlanılmıştır. Bunun için yelpaze şeklinde gelen ışınlar karşılık daha çok sayıda dedektör kullanılarak tek seferde daha çok veri toplanabiliyordu. Bu makinelerde kullanılan yelpaze ışın kaynağının kapsamı (5-12 derece) çok geniş değildir. Birinci nesil makinelerde olduğu x-ışını kaynağı ve dedektörler doğrusal ve dönme hareketi yapmaktadır. Ancak yine de birinci nesil BT makinelerine göre belirgin bir hız artışı elde edilebilmiştir. İkinci nesil BT makinelerinde ortalama bir tarama süresi yaklaşık 90 saniyedir.</p>	

<b>3. Jenerasyon BT</b>	<p>Üçüncü nesil BT makineleri modern BT makinelerinin bazı temel özelliklerine sahiptir. Bunlardan bir tanesi makinenin mekanik olarak basit ve sade bir yapıya sahip olmasıdır. Geniş yelpaze ışın (42 derece) tipine sahip x-ışını kaynağı ve dedektörler, karşılıklı olarak gantriye sabitlenmişlerdir. Böylece bir x-ışını kaynağı ve ona karşılık gelen, dedektörlerden oluşmuş yay şeklindeki bir yapı gantri ile beraber tarama bölgesi etrafında dönerek veri toplamaktadır. Böylece doğrusal hareket olmadan daha sade bir mekanizma geliştirilmiştir. Üçüncü nesil BT makinelerinde ortalama bir tarama süresi yaklaşık 5 saniyedir. Üçüncü nesil BT makinelerinin dedektör sayılarının artırılması gibi bazı özellikleri değiştirilerek farklı versiyonları üretilmiştir. Günümüzde kullanılan birçok modern BT makinesinin temelini oluşturmaktadır.</p>	
<b>4. Jenerasyon BT</b>	<p>Dördüncü nesil bilgisayarlı tomografi makinelerinde dedektörler dairesel olarak sabitlenmişlerdir. Dedektör sayısı üçüncü nesil BT makinelerine göre yaklaşık üç kat daha fazladır. Bu makinelerde sadece x-ışını kaynağı dönerek tarama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Tarama işlemi birkaç saniye sürmektedir.</p>	
<b>5. Jenerasyon BT</b>	<p>Son nesil olan beşinci nesil BT makinelerinde verinin toplanması önceki nesillere göre oldukça farklıdır. Bu makinelerde hem ışın kaynağı hem de dedektör sabittir. Bu tasarımda kaynağın (tüpün) fiziksel olarak hareketi yerine elektronlar manyetik olarak yönlendirilmektedir. Bu nedenle veriler diğer BT makinelerine göre çok daha hızlı elde edilebilmektedir. Kesit elde etme süresi saniyenin altına düşmüştür. Beşinci nesil BT makineleri özellikle kardiyak tarama alanında tercih edilmektedir. Ancak kısıtlı kullanım alanı ve ekipmanlarının çok pahalı oluşu önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.</p>	

### 3.1. Bilgisayarlı tomografi teknolojilerinde kullanılan x-ışını konfigürasyonları

Bilgisayarlı tomografide zaman içerisinde üç farklı ışın konfigürasyonu geliştirilmiştir. Bunlar paralel ışın, fan ışını ve konik ışın konfigürasyonlarıdır (Şekil5). Paralel ışın geometri x-ışın kaynakları birinci nesil BT makinelerinde kullanılmışlardır. Bu ışınlar kalem şeklindedir ve ışın kaynağı ve dedektör aynı doğrultuda beraber hareket etmektedir. Daha

sonra döndürülerek işlem tekrar etmektedir. Bu şekilde ancak tek bir kesit görüntüsü elde edilebilmektedir. Çok yavaş olması ve döndürme hareketine ilaveten doğrusal hareket gerektirmesi bu teknikten vazgeçilmesine neden olmuştur. Daha sonraları yelpaze ışın geometrisi geliştirilmiş ve özellikle üçüncü nesil BT makinelerinde etkili bir şekilde kullanılmışlardır. Her bir dönüş hareketiyle bir kesit taraması yapılabilmektedir. Ancak bir bölgenin taranması için çok sayıda dönüş hareketinin yapılması gerekmektedir. Bunun üzerine daha az dönme hareketine ihtiyaç duyan ve bir seferde daha çok verinin toplanmasına imkân veren konik ışın geometrisi geliştirilmiştir. Konik ışının daha geniş bir alanı kaplaması neticesinde dedektör satır sayısı artırılmıştır. Konik ışın BT'de daha az dönme sayısı ile taramalar yapılabilmektedir ve bir dönüşte bir kesit yerine bir hacim taranabilmektedir.



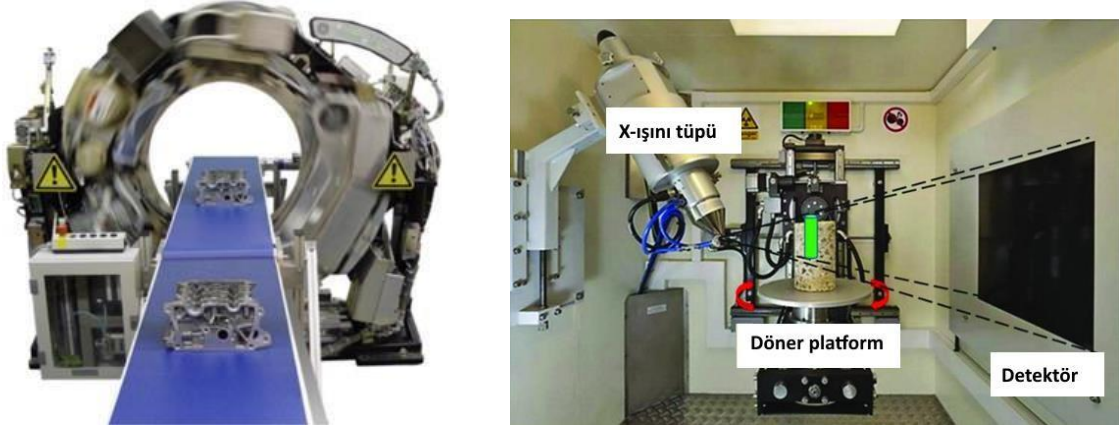
**Şekil 5.** Bilgisayarlı tomografide teknolojilerinde kullanılan paralel, fan ve konik x-ışını konfigürasyonları.

Dedektör satır sayılarının artırılarak üçüncü nesil bilgisayarlı tomografi makinelerinin geliştirilmesiyle çoklu-dedektörlü BT (multi-detector CT - MDCT) [31] olarak da anılan makineler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Zaman içinde geliştirilen ışın konfigürasyonları tarama hızlarını önemli ölçüde artırmıştır. Yelpaze ışın ile paralel ışına göre bir kesit çok daha hızlı taranabiliyorken konik ışın ile bir organ saniyeler içinde taranabilmektedir.

Yelpaze ışınli bilgisayarlı tomografide x-ışını yelpaze şeklinde ilerler ve dilim şeklinde kesit görünüşler elde edilir. Daha sonra dilimler üst üste bindirilir. Konik ışınli bilgisayarlı tomografide ise x-ışınları objenin etrafından bir sefer geçirilir ve görüntü elde edilir. Bu farklılık konik ışınli bilgisayarlı tomografiyi daha az radyasyon oluşturduğu için, özellikle tıbbi uygulamalar düşünüldüğünde daha avantajlı duruma geçirmektedir.

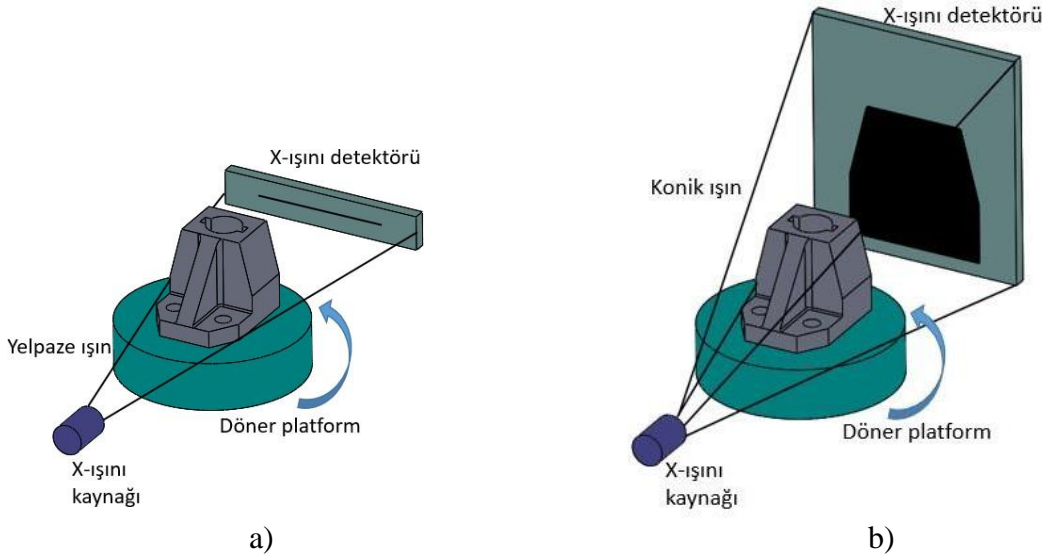
#### 4. ENDÜSTRİYEL BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ (EBT)

Endüstriyel bilgisayarlı tomografi, tıp alanındaki BT tarama cihazları ile benzer teknolojiyi kullanan, endüstriyel parçaların iç ve dış kısımlarının tahribatsız olarak taranmasını mümkün kılan bir 3B tarama teknolojisidir. Genelde tersine mühendislik uygulamalarında kullanılan bu teknoloji endüstriyel alanlarda ölçüm ve üretilen parçaların tahribatsız muayenesi için de tercih edilmektedir. EBT teknolojisi x-ışınının nesnelere nüfuz etme özelliğinden faydalandığı için bu teknoloji ile taranan parçaların iç detayları da hassas bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu özellik diğer 3B tarama teknolojilerinde [7-9] bulunmadığından EBT'nin diğer teknolojilerden ayrıldığı en önemli avantajı olarak görülebilir. X-ışını kaynağından çıkan ışınlar objeden geçerek x-ışını dedektörüne ulaşır. Böylece objenin 2D radyografik bir görseli elde edilir. Bu teknolojiye tıp alanındaki BT teknolojisindeki gibi objenin dönmeden sadece ilerlediği sistemler [32] kullanılsa da canlı olmayan, endüstriyel nesnelere taranması esas olduğundan objenin kendi ekseninde döndürüldüğü sistemler [33] daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Endüstriyel bilgisayarlı tomografi makineleri [32, 33]

3B taramanın doğru ve güvenli bir şekilde tamamlanabilmesi için uygulama, x-ışınlarının geçtiği kapalı bir oda içinde gerçekleşir. Obje kendi ekseninde döndürülürken tomografi işlemi devam eder ve objenin farklı pozisyonlarında yüzlerce kesit görüntüsü elde edilir. Tarama sonunda objenin tüm geometrisini ve malzeme bileşimini açıklayan bir hacim modeli elde edilir. Endüstriyel bilgisayarlı tomografide tıp alanında kullanılan BT'de olduğu gibi yelpaze ışın ve konik ışın tomografi yöntemleri mevcuttur. Bu teknolojiye farklı olarak taranan nesnelere döner bir platform üzerine yerleştirilirler (Şekil 7).



**Şekil 7.** Endüstriyel bilgisayarlı tomografi yöntemleri: a) Yelpaze ışınli bilgisayarlı tomografi, b) konik ışınli bilgisayarlı tomografi

Döner platformulu EBT cihazlarında taranan modelin çözünürlüğü dönme açısına göre değişecektir. Tam bir tur (360 derece) tamamlanınca elde edilen 3B model, seçilen tarama aralığına (1 - 0.1 derece) göre farklı çözünürlüklerde elde edilebilir. Çözünürlüğün artırılması için tarama aralığı (derecesi) azaltılır. Böylece taramayı tamamlamak için yaklaşık 360-3600 aralığında x-ışını gönderilmiş olur.

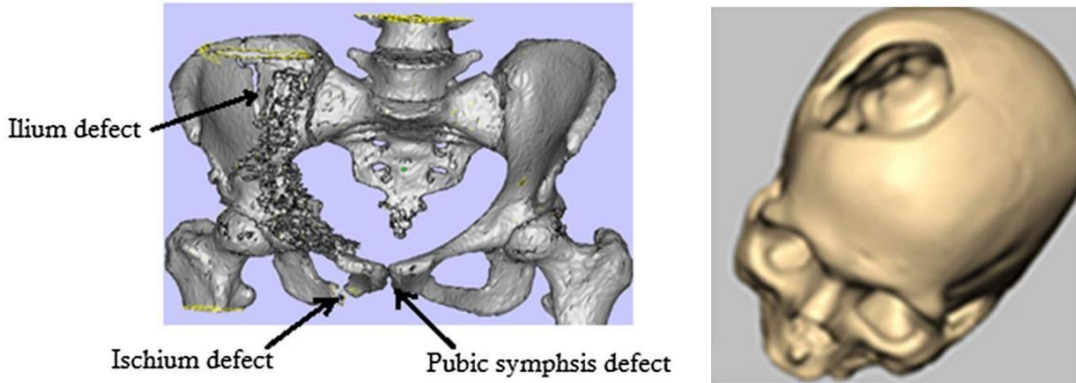
## 5. BT TARAMANIN AKADEMİK UYGULAMALARI

BT tıp alanında çoğunlukla tümörlerin tanımlanmasında; iç kanamaların ve vücut içinde yara veya hasarların araştırılmasında; koroner arter hastalığı, kan damarı anevrizmaları ve kan pıhtıları gibi dolaşım sistemi hastalıklarının ve durumlarının teşhisinde; biyopsi ve ameliyatlardan önce yer tespitinde; omurga durumunun incelenmesinde; böbrek ve mesane taşları, apseler, ülseratif kolit ve sinüzit gibi iltihaplı hastalıkların teşhisinde tercih edilmektedir. Ayrıca BT ile görüntüleme bir cerrahi operasyon sırasında intraoperatif olarak da kullanılmaktadır [34]. Intraoperatif BT'nin kullanımı operasyonların süresini önemli ölçüde artırmadığı gibi implantların daha yüksek doğrulukla yerleştirilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır.

BT taramayla vücut içindeki kemik, iç organ, damar gibi çeşitli yapı ve dokuların detaylı görüntüleri elde edilebildiği ve sonrasında bu görüntüler 3B modellere

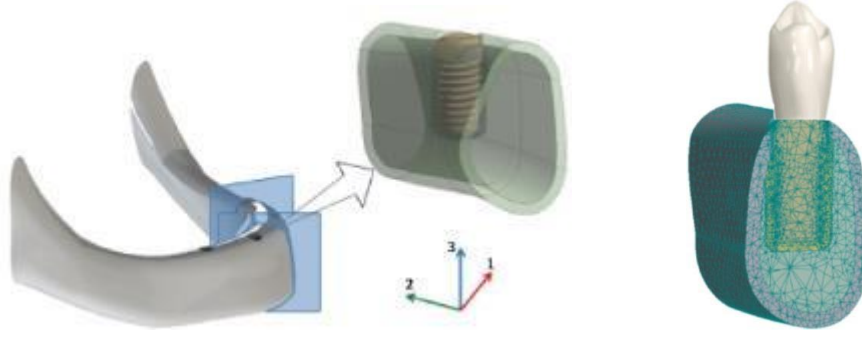
dönüştürülebildiği için BT tarama, birçok tıbbi ve biyomekanik araştırmada da sıklıkla başvurulan bir teknoloji olmuştur. Bu araştırma ve bilimsel çalışmalar günümüzde artarak devam etmekte, yeni tıbbi yöntemlerin ve biyomedikal ürünlerin geliştirilmesinde büyük rol oynamaktadırlar. Aşağıda BT teknolojisinin kullanıldığı, tıp, biyomekanik, mühendislik ve diğer alanlarda yakın zamanda yapılan bilimsel araştırmalardan örneklere yer verilmiştir.

Modi ve Sanadhya yaptıkları çalışmada [35] , BT tarama verilerinden hastaya özel biyomodeller ve implantlar tasarlamak ve üretmek için bir metodolojiyi geliştirmişlerdir. Kısa sürede, düşük maliyetle, hastaya özel olarak tasarım ve üretimin amaçlandığı çalışmada sonlu elemanlar metodu, 3B baskı yanı sıra BT tarama teknolojisinden etkin bir şekilde faydalanılmıştır. Pelvik kemiği ve kafatası için yaptıkları BT taramasında SOMATOM Definition AS 64-slice BT tarayıcı (Siemens Medical Systems, Erlangen, Almanya) ve tüp voltajı 100 kV, tüp akımı 120 mA ve kesit kalınlığı 1.2 mm olarak belirledikleri parametreleri kullanmışlardır. Elde ettikleri DICOM verilerinden dönüştürdükleri CAD modelleri Şekil 8 'de gösterilmektedir.



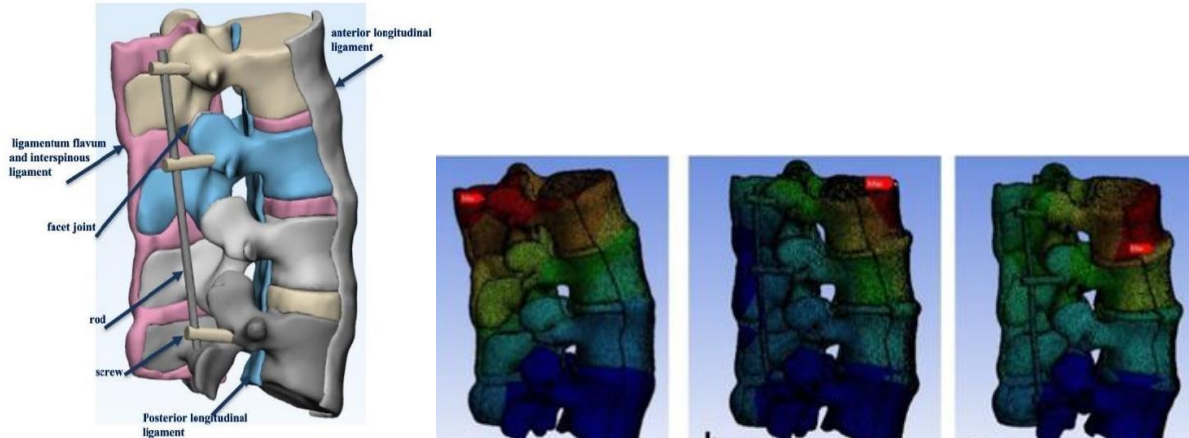
**Şekil 8.** BT teknolojisinden faydalanılarak elde edilen pelvis kemiğinin CAD modeli ve hasarlı kafatası kemiğinin CAD modeli [35].

Zanetti ve ark. dental implant tedavisinde kullanılan implant modellerinin osseointegrasyon sırasında kemik-implant sisteminin doğal frekansındaki değişimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak farklı şekillere ve yiv aralıklarına sahip implantların rezonans frekanslarında önemli ölçüde farklılıklar tespit etmişlerdir [22]. Bu çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılarak modal analiz yapılmıştır. Bu analizin gerçekleştirilebilmesi için gereken mandibular kemik yapısının CAD modeli (Şekil 9) ise görüntü segmentasyonu yoluyla bir BT tarama veri setinden oluşturulmuştur.



**Şekil 9.** BT kullanılarak oluşturulmuş mandibular kemik, implant sistemi ve sonlu elemanlar modeli [22]

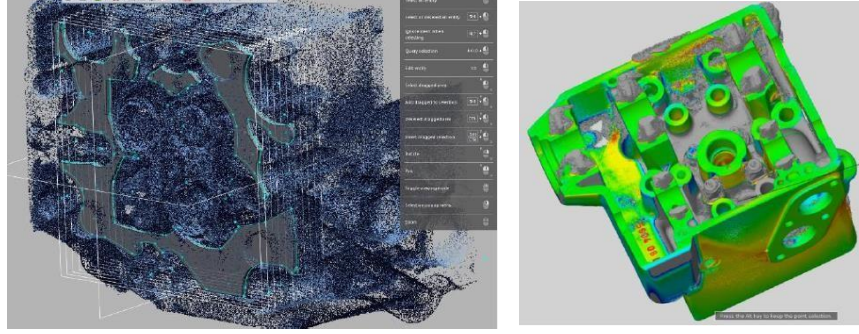
Akıncı ve ark. adolesan idiyopatik bir hastanın BT verilerini kullanarak omur, faset ve ligamentlerden oluşturulan 3B modeli üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle omurga implantı olmadan, titanium implantı kullanarak ve polietereeterketon (PEEK) implantı kullanarak üç farklı durum için omurga ve implantlar üzerindeki stres dağılımlarını incelemişlerdir [14] (Şekil 10).



**Şekil 10.** BT teknolojisinden faydalanılarak oluşturulan omurga modeli (L2-L5) ve sırasıyla implantsız, titanium rodlu, PEEK rodlu sonlu elemanlar modelleri ve analiz sonuçları [14].

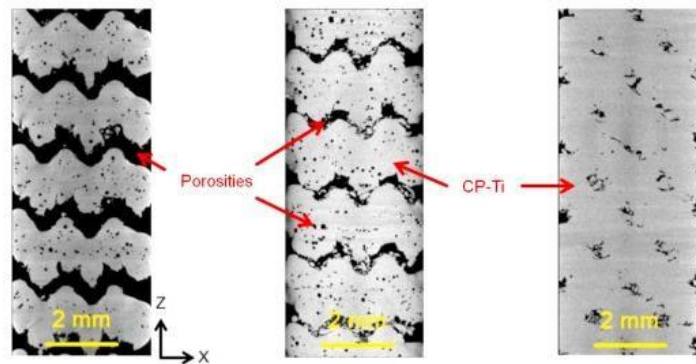
BT tarama, taranan parçaların iç kısımları ile ilgili veri sağladığı için tıp alanının dışında da endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca BT'nin diğer tarama yöntemlerine karşı sağladığı bu üstünlüğü, onu tahribatsız muayene ve bazı tersine mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir. Cieslik ve ark. değişken valf zamanlaması ile çalışması için bir silindirik test motorunun modernizasyonu üzerinde araştırma yapmışlardır [19]. Motor yapısının çok karmaşık iç kısımlarının modellenmesinde BT tarama teknolojisi kullanılarak tersine mühendislik uygulaması

yapılmıştır (Şekil 11). Çalışmalarında BT taramanın, metodolojinin geliştirilmesinde, geometrik ve yapısal projenin oluşturulmasında ve silindir kafasının tasarımında çok verimli bir şekilde kullanılabildiğini belirtmişlerdir.



**Şekil 11.** Soğutma sisteminin iç alanlarını da gösteren BT taramadan elde edilen nokta bulutu modeli ve sapma analizi uygulanan 3B model [19].

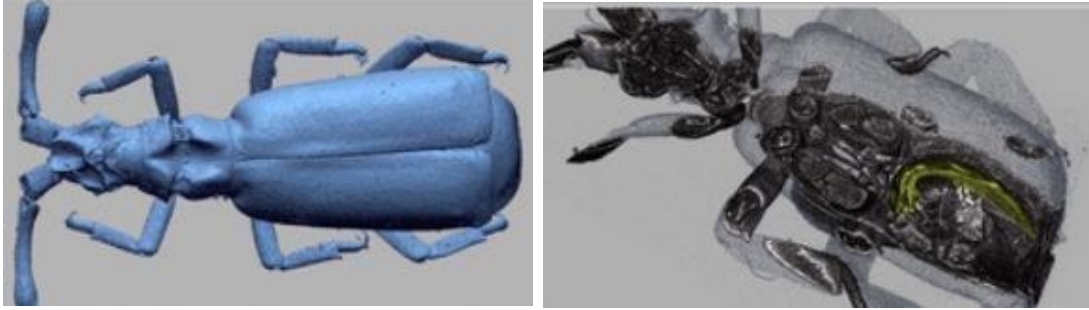
Khosravan ve Reinicke yaptıkları çalışmada [36] BT taramayı kullanılarak son yılların popüler teknolojilerinden biri olan 3B baskı (eklemeli imalat) ile üretilen ürünlerin analizlerine yer vermişlerdir. Günümüzde artık eklemeli imalat son ürün fabrikasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bu ürünlerin kullanım amacına uygun olup olmadığının detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Khosravan ve Reinicke de hem metalik hem de polimerik 3D baskılı parçaların kusur tespiti, boyutsal değerlendirme, yoğunluk ölçümü ve yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde BT taramanın potansiyellerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca Attar ve ark. yaptıkları çalışmada [20] 3B baskı teknolojilerinden biri olan seçmeli lazer eritme (SLM) kullanarak üç farklı gözeneklilik seviyesinde (%10, %17 ve %37) ürettikleri kompozit parçalardaki mekanik davranışları yaptıkları basma testi sonrası BT ile analiz etmişlerdir (Şekil 12).



**Şekil 12.** %37, %17 ve %10 gözeneklilik seviyesine sahip SLM ile işlenmiş CP-Ti parçalarının  $\mu$ -CT görüntüleri [20].



Mensa ve ark. Diptera, Coleoptera ve Hymenoptera türlerinin 3 boyutlu rekonstrüksiyonlarını hazırlamak için mikro-BT teknolojisini kullanmışlardır. Böceklerin hem dış hem de iç yapısının rekonstrüksiyonu gerçeğe uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir [21]. Görüntüler 1 µm çözünürlük elde edebilen bir tungsten hedef ile donatılmış mikro-BT “Nanotom S” (GE Phoenix) makine ile kullanılarak elde edilmiştir. Ortalama enerji 20 keV, hızlanma voltajı 50 kV ve akım 200/250 µA olarak belirlenmiş ve her numune 0,25 derecelik adımlarla 360° döndürülmüştür. Toplamda 1441 projeksiyon (2304 × 2304 piksel) elde edilmiştir. Bu çalışma ile mikro-BT’nin morfolojik analizler için kullanımının mümkün olduğu vurgulanmıştır.



**Şekil 13.** Bir böceğin (paussus batillarius) mikro-BT verilerinden elde edilmiş dış görünümü ve iç organlarının gösterildiği 3B rekonstrüksiyonu [21].

## 6. SONUÇ

Bilgisayarlı tomografi teknolojisinin, tıp alanından çeşitli endüstriyel alanlara kadar gerek görüntüleme gerekse 3B modellerin elde edilmesinde oldukça yüksek bir potansiyele sahip olduğu anlaşılmaktadır. BT ile detaylı görüntülerin elde edilebilmesi teşhis koymayı kolaylaştırmakla beraber 3B görüntüleme ile keşif amaçlı cerrahiye bir alternatif oluşturabilir. BT teknolojisinde iyonize radyasyon kullanıldığı için canlılar üzerinde yapılan taramalarda gerekli prosedürlere dikkat edilmelidir. Tıp alanında, özellikle BT’nin kanser oluşumuna etkileri ve radyasyon dozunu düşürmeye yönelik çalışmalar sürmektedir.

BT ile elde edilen görüntülerin bazı bilgisayar yazılımları yardımıyla 3B modellere dönüştürülebilmesi ve bu modellerin mühendislik alanında mekanik simülasyonlarda kullanılabilmesi, yeni operasyon yöntemleri ve implant teknolojilerinin gelişimine olumlu katkılar sağlamıştır. Bununla birlikte BT taramanın, günümüzde hızla yaygınlaşan, BT tarama gibi katmanların birbirine eklenmesi prensibine dayanan, serbest-formlu objelerin kolaylıkla

imal edilebildiği eklemeli imalat (3B baskı) teknolojileri ile uyumlu bir şekilde kullanılabilceği görülmektedir.

BT taramayla parçaların iç kısmındaki yapıların görüntülenip modellenebilmesi BT'yi tersine mühendislikte kullanılan diğer tarama yöntemlerine göre ayrıcalıklı kılmakta, tıp alanı dışında mühendislik ve diğer alanlarda da önemli bir tarama teknolojisi yapmaktadır. Buna karşın BT tarayıcıları ilk yatırım maliyeti yüksek makinelerdir. Bu yüzden tarama ihtiyacının yoğun olmadığı koşullarda BT taramasını dışardan temin etmek daha uygun olabilir. BT taramayla parçalar hızlı bir şekilde taranabilmektedir, ancak taranan parçanın boyutu makinenin boyutu ile sınırlıdır. Bu nedenle makinenin tarama hacminden daha büyük parçaların tarama işlemi için farklı yöntemler tercih edilebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Withers, P. J., Bouman, C., Carmignato, S., Cnudde, V., Grimaldi, D., Hagen, C. K., Stock, S. R. (2021). X-ray computed tomography. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 1-21.
- [2] Yu, Q., Liu, H., Yang, T., Liu, H. (2018). 3D numerical study on fracture process of concrete with different ITZ properties using X-ray computerized tomography. *International Journal of Solids and Structures*, 147, 204-222.
- [3] Marston, V. (2020). *Computed Axial Tomography Basics. Fast Facts for the Radiology Nurse: An Orientation and Nursing Care Guide*, 67.
- [4] Ambrose J, Hounsfield G (1973) Computerized transverse axial tomography. *Br J Radiol* 46:148-149
- [5] Hounsfield GN (1973) Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1. Description of system. *Br J Radiol* 46:1016-1022
- [6] Owczarek, D., Ostrowska, K., Śladek, J. A. (2017). Examination of optical coordinate measurement systems in the conditions of their operation. *Journal of Machine Construction and Maintenance-Problemy Eksploatacji*.
- [7] Bannink, T., Bouman, S., Wolterink, R., van Veen, R., van Alphen, M. (2021). Implementation of 3D technologies in the workflow of auricular prosthetics: A method

- using optical scanning and stereolithography 3D printing. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(4), 708-713.
- [8] Yang, S., Shi, X., Zhang, G., Lv, C. (2018). A dual-platform laser scanner for 3D reconstruction of dental pieces. *Engineering*, 4(6), 796-805.
- [9] Puerta, A. P. V., Jimenez-Rodriguez, R. A., Fernandez-Vidal, S., Fernandez-Vidal, S. R. (2020). Photogrammetry as an Engineering Design Tool. In *Product Design*. IntechOpen.
- [10] Jerban, S., Chang, E. Y., Du, J. (2020). Magnetic resonance imaging (MRI) studies of knee joint under mechanical loading. *Magnetic resonance imaging*, 65, 27-36.
- [11] Elad, B., Lessick, J., Adler, Z., Caspi, O. (2022). Three-Dimensional Computed Tomography Reconstruction for Diagnosis of Left Ventricular Assist Device Outflow Graft Twist. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 15(4), e013714.
- [12] Stier, C., Parmar, C., Koschker, A. C., Bokhari, M., Stier, R., Chiappetta, S. (2020). Computed tomography-3D-volumetry: a valuable adjunctive diagnostic tool after bariatric surgery. *Mini-invasive Surgery*, 4.
- [13] Feng, Y., Shu, J., Liu, Y., Zheng, T., Shao, B., Liu, Z. (2021). Biomechanical analysis of temporomandibular joints during mandibular protrusion and retraction motions: A 3d finite element simulation. *Computer methods and programs in biomedicine*, 208, 106299.
- [14] Akıncı, S. Z., Karabulut, D., Sürmen, H. K., Yaman, O., Arslan, Y. Z. (2022). The Effect of PEEK-Rod Fixation Systems on Finite Element Lumbar Spine Model. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 783-786.
- [15] Islam, M. N., Khan, J., Ikematsu, K., Bagali, P. G., Raman, V. K. (2018). Digital Autopsy: Popular Tools for an Unpopular Procedure. *Arab Journal of Forensic Sciences & Forensic Medicine*, 1(7), 792-799.
- [16] Buchlak, Q. D., Milne, M. R., Seah, J., Johnson, A., Samarasinghe, G., Hachey, B., Brotchie, P. (2022). Charting the potential of brain computed tomography deep learning systems. *Journal of Clinical Neuroscience*, 99, 217-223.

- [17] Kumamaru, K. K., Fujimoto, S., Otsuka, Y., Kawasaki, T., Kawaguchi, Y., Kato, E., Aoki, S. (2020). Diagnostic accuracy of 3D deep-learning-based fully automated estimation of patient-level minimum fractional flow reserve from coronary computed tomography angiography. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, 21(4), 437-445.
- [18] Zhang, P., Lee, Y. I., Zhang, J. (2019). A review of high-resolution X-ray computed tomography applied to petroleum geology and a case study. *Micron*, 124, 102702.
- [19] Cieřlik, W., Szwajca, F., Wisłocki, K. (2022). Reverse engineering of research engine cylinder-head. *Combustion Engines*, 61.
- [20] Attar, H., Löber, L., Funk, A., Calin, M., Zhang, L. C., Prashanth, K. G., Eckert, J. (2015). Mechanical behavior of porous commercially pure Ti and Ti–TiB composite materials manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 625, 350-356.
- [21] Mensa, F. S., Muzzi, M., Spani, F., Tromba, G., Dullin, C., Di Giulio, A. (2022). When the Utility of Micro-Computed Tomography Collides with Insect Sample Preparation: An Entomologist User Guide to Solve Post-Processing Issues and Achieve Optimal 3D Models. *Applied Sciences*, 12(2), 769.
- [22] Zanetti, E. M., Ciaramella, S., Cali, M., Pascoletti, G., Martorelli, M., Asero, R., Watts, D. C. (2018). Modal analysis for implant stability assessment: Sensitivity of this methodology for different implant designs. *Dental Materials*, 34(8), 1235-1245.
- [23] Boas, F. E., Fleischmann, D. (2012). CT artifacts: causes and reduction techniques. *Imaging Med*, 4(2), 229-240.
- [24] Yu Z, Thibault JB, Bouman CA, Sauer KD, Hsieh J: Fast model-based X-ray CT reconstruction using spatially nonhomogeneous ICD optimization. *IEEE Trans Image Process* 20(1), 161-175 (2011).
- [25] Thibault JB, Sauer KD, Bouman CA, Hsieh J: A three-dimensional statistical approach to improved image quality for multislice helical CT. *Med Phys* 34(11), 4526-4544 (2007)
- [26] Boas FE, Fleischmann D: Evaluation of two iterative techniques for reducing metal artifacts in computed tomography. *Radiology* 259(3), 894-902 (2011).

- [27] Eckel, S., Zscherpel, U., Huthwaite, P., Paul, N., Schumm, A. (2020). Radiographic film system classification and noise characterisation by a camera-based digitisation procedure. *NDT & E International*, 111, 102241.
- [28] Başekim, C. Ç., Arslanoğlu, A. (2020). Bilgisayarlı Tomografide Radyasyon Doz Kontrolü ve Düşük Doz Çekim Teknikleri.
- [29] Kamalian, S., Lev, M. H., Gupta, R. (2016). Computed tomography imaging and angiography—principles. *Handbook of clinical neurology*, 135, 3-20.
- [30] Modjtahedi, B. S., Rong, A., Bobinski, M., McGahan, J., Morse, L. S. (2015). Imaging characteristics of intraocular foreign bodies: a comparative study of plain film X-ray, computed tomography, ultrasound, and magnetic resonance imaging. *Retina*, 35(1), 95-104.
- [31] Sollmann, N., Mei, K., Hedderich, D. M., Maegerlein, C., Kopp, F. K., Löffler, M. T., Noël, P. B. (2019). Multi-detector CT imaging: impact of virtual tube current reduction and sparse sampling on detection of vertebral fractures. *European radiology*, 29(7), 3606-3616.
- [32] De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R., Weckenmann, A. (2014). Industrial applications of computed tomography. *CIRP annals*, 63(2), 655-677.
- [33] Wu, Y., Saxena, S., Xing, Y., Wang, Y., Li, C., Yung, W. K., Pecht, M. (2018). Analysis of manufacturing-induced defects and structural deformations in lithium-ion batteries using computed tomography. *Energies*, 11(4), 925.
- [34] Kumar, V., Baburaj, V., Patel, S., Sharma, S., Vaishya, R. (2021). Does the use of intraoperative CT scan improve outcomes in Orthopaedic surgery? A systematic review and meta-analysis of 871 cases. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 18, 216-223.
- [35] Modi, Y. K., Sanadhya, S. (2018). Design and additive manufacturing of patient-specific cranial and pelvic bone implants from computed tomography data. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(10), 1-11.
- [36] Khosravani, M. R., Reinicke, T. (2020). On the use of X-ray computed tomography in assessment of 3D-printed components. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39(4), 1-17.