



**İNSAN RADIUS KEMİĞİNİN FARKLI MEDİKAL
PROGRAMLARLA OLUŞTURULAN
ÜÇ BOYUTLU MODELLERİNİN
GEOMETRİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatma Nur KARAKUŞ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNSAN RADIUS KEMİĞİNİN FARKLI MEDİKAL
PROGRAMLARLA OLUŞTURULAN ÜÇ BOYUTLU
MODELLERİNİN GEOMETRİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI**

Fatma Nur KARAKUŞ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Fatma Nur KARAKUŞ tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13 / 02 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

Başkan : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdülkadir BİLİR
Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri
Üniversitesi, Tıp Fakültesi

..... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13 / 02 / 2023

İmza

Fatma Nur KARAKUŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSAN RADIUS KEMİĞİNİN FARKLI MEDİKAL PROGRAMLARLA OLUŞTURULAN ÜÇ BOYUTLU MODELLERİNİN GEOMETRİK OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Fatma Nur KARAKUŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM

Bu araştırmada, medikal sektörde kullanılan ve dokuların üç boyutlu (3B) olarak oluşturulmasını sağlayan üç farklı programdan elde edilen insan Radius kemiğine ait veriler hem kendi aralarında ve hem de referans yöntemiyle oluşturulan veriler ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Referans yöntemi tersine mühendislik yönteminde kullanılan cihazlardan birisi olan 3B lazer tarayıcı olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan medikal programlar Mimics, 3D Slicer ve 3D Doctor olarak seçilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen istatistik analizde dört grubun kendi aralarındaki karşılaştırmaları Kruskal Wallis testi ile grupların ikili karşılaştırmalar ise Mann Withney U testi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre her iki karşılaştırma sonucunda yöntemler arasında anlamlı bir fark ($p<0.05$) oluşmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar bize araştırmamız dahilinde medikal alanda her üç programında birbirleri yerine kullanılabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

2023, x + 72 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tersine mühendislik, Medikal programlar, Medikal görüntüleme, 3B modelleme.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

GEOMETRICAL COMPARISON OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF THE HUMAN RADIUS BONE CREATED WITH DIFFERENT MEDICAL PROGRAMS

Fatma Nur KARAKUŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Özgür VERİM

In this study, the data of the human Radius bone obtained from three different programs used in the medical sector and enabling the creation of tissues in three dimensions (3D), were compared statistically with both each other and the data created by the reference method. The reference method was determined as a 3D laser scanner, which is one of the devices used in the reverse engineering method. The medical programs used in the study were selected as Mimics, 3D Slicer and 3D Doctor. In the statistical analysis performed in the study, the comparisons between the four groups were made with the Kruskal Wallis test, and the pairwise comparisons of the groups were made with the Mann Withney U test. According to the results of the analysis, it was seen that there was no significant difference ($p<0.05$) between the methods as a result of both comparisons. These results lead us to the conclusion that all three programs in the medical field can be used interchangeably within the scope of our research.

2023, x + 72 pages

Keywords: Reverse engineering, Medical programs, Medical imaging, 3D modelling.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi, yazımı aşamasında ve bu süre boyunca büyük sabır ve desteklerinden dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Özgür VERİM'e, araştırma ve yazım süresince büyük yardım ve destek gördüğüm kardeşim Yasemin KARAKUŞ'a, hayatım boyunca her konuda bana olan inanç ve desteklerini her zaman hissettiren ailemin her ferdine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Fatma Nur KARAKUŞ
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
Sayfa	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Tersine Mühendisliğin Günümüz Endüstrisinde Kullanım Sebepleri	6
2.2 Tersine Mühendislikte İşlem Basamakları	7
2.2.1 Temaslı Yöntemler.....	10
2.2.1.1 Robotik (Mekanik) Kollar	11
2.2.1.2 Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM).....	12
2.2.1.3 Geleneksel Yöntem	16
2.2.2 Temassız Yöntemler.....	16
2.2.2.1 Yansıtıcı Yöntemler	16
2.2.2.2 Aktarıcı Yöntemler.....	22
2.3 Tersine Mühendislik Yönteminin Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleme Cihazı ile Uygulanması	24
2.4 Bilgisayarlı Tomografinin Tarihçesi.....	24
2.5 Bilgisayarlı Tomografinin Çalışma Prensipleri	25
2.6 Diğer Görüntüleme Yöntemlerine Göre Avantajları	26
2.7 Tersine Mühendislik Yönteminin Kullanıldığı Alanlar ve Yapılan Çalışmalar	27
2.7.1 Eğitim.....	27
2.7.2 Ürün Geliştirme.....	27
2.7.3 Otomotiv	29
2.7.4 Restorasyon	30
2.7.5 Tıp	30
3. MATERYAL ve METOT	33

3.1 Aktarıcı Yöntemler ile 3B modelleme İşleminde Kullanılan Programlar	33
3.1.1 3D Slicer	33
3.1.1.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma	34
3.1.1.2 Hacim Oluşturma	35
3.1.2 3D Doctor.....	37
3.1.2.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma	37
3.1.2.2 Hacim Oluşturma	38
3.1.3 3D Mimics.....	41
3.1.3.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma	41
3.1.3.2 Hacim Oluşturma	42
3.1.4 Endüstriyel Tip 3B Tarayıcı (KScan-Magic).....	43
3.1.4.1 Çalışma Prensibi.....	44
3.1.4.2 Kullanım Alanları.....	46
3.2 Radius Kemiğinin Anatomisi.....	46
3.3 Radius Kemiklerinin Morfometrik Ölçümleri	49
4. BULGULAR	53
4.1 Hacim Ölçümleri.....	53
4.2 Radius Kemiklerinin Morfometrik Ölçümleri	53
4.3 Morfometrik Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirmesi.....	56
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	62
6. KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	72

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
BT	Bilgisayarlı Tomografi
CAD	Computer Aided Design- Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Computer Aided Manufacturing- Bilgisayar Destekli İmalat
CAT	Bilgisayarlı Eksenel Tomografi
CMM	Koordinat Ölçüm Makineleri
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
CTAT	Bilgisayarlı Transaksiyal Tomografi
DAT	Dijital Eksenel Etomografi
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
FDM	Fused Deposition Modeling- Eriyik Yığılma Modelleme
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
MR	Manyetik Rezonans
NC	Sayısal Kontrol
NDT	Tahribatsız Muayene Deneyi
STL	Standart Triangle Language
TME	Temporomandibular Eklem

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Otomotiv sektöründe yedek parça alanında tersine mühendislik	3
Şekil 1.2 Beyaz eşya sektöründe yedek parça alanında tersine mühendislik.....	3
Şekil 2.1 Geleneksel ve Tersine mühendisliğin akış şeması	5
Şekil 2.2 Tersine mühendislikte kullanılan veri toplama yöntemleri.....	10



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Radius kemiklerine ait morfometrik ölçümleri	50
Çizelge 4.1 Radius kemiklerinin yöntem ve programlara göre hacim ölçümleri	53
Çizelge 4.2 Radius kemiklerinin Mimics programındaki morfometrik ölçümleri	54
Çizelge 4.3 Radius kemiklerinin 3D Doctor programındaki morfometrik ölçümleri ..	54
Çizelge 4.4 Radius kemiklerinin 3D Slicer programındaki morfometrik ölçümleri	55
Çizelge 4.5 Radius kemiklerinin 3B Tarayıcı yöntemiyle morfometrik ölçümleri	55
Çizelge 4.6 Radius kemiğine ait parametrelerin istatistiksel incelenmesi	56
Çizelge 4.7 Hipotez Test Özeti	57
Çizelge 4.8 Mann-Whitney Test	58
Çizelge 4.9 Test Statistics	58
Çizelge 4.10 Mann-Whitney Test	59
Çizelge 4.11 Test Statistics	59
Çizelge 4.12 Mann-Whitney Test	60
Çizelge 4.13 Test Statistics	60

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Tersine mühendislik prosesi işlem basamakları	9
Resim 2.2 Robotik (mekanik) Kol.	11
Resim 2.3 Köprü tipi CMM cihazı.....	13
Resim 2.4 Dört kollu tip CMM cihazı	14
Resim 2.5 Dirsek tip CMM cihazı	15
Resim 2.6 Yatay kol tip CMM cihazı	15
Resim 2.7 Lazer üçgenleme yöntemi	17
Resim 2.8 Uçuş zamanı yöntemi.....	18
Resim 2.9 İnterferometre yöntemi	18
Resim 2.10 Yapısal ışıklandırma yöntemi	19
Resim 2.11 Stereo görüntü analiz yöntemi	20
Resim 2.12 Fotogrametri yöntemi	20
Resim 2.13 Topografik yöntemi	21
Resim 2.14 Akustik (sonar) cihazı çalışma şekli	22
Resim 2.15 Bilgisayarlı Görüntüleme Cihazı	23
Resim 2.16 Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazı	23
Resim 2.17 Tarayıcı ile üründen alınan nokta bulutu ve 3B boyutlu çizim.....	28
Resim 2.18 Al Zubarah kalesinin dış duvarlarının (solda) ve iç alanının (sağda) 3 boyutlu yüzey modeli	30
Resim 2.19 Yeni tasarlanan TME protezinin eklem serbestliği.....	31
Resim 2.20 3B Baskı ile oluşturulan model.....	32
Resim 2.21 3B Baskı ile yapılan titanyum protez.....	32
Resim 3.1 Slicer DICOM dosyası aktarımı.....	34
Resim 3.2 Slicer programına yüklenen görüntülerin görünüşleri	35
Resim 3.3 Slicer görüntü düzenleme adımı	35
Resim 3.4 Slicer Treshold ayar ekranı	36
Resim 3.5 Slicer 3B oluşan görüntü.....	36
Resim 3.6 Slicer programında yer alan düzenleme butonları	36
Resim 3.7 3D Doctor DICOM dosya aktarımı adım 1	37
Resim 3.8 3D Doctor Dicom dosya aktarımı adım 2	38

Resim 3.9 3D Doctor 3B hacim oluşturma basamakları.....	38
Resim 3.10 3D Doctor programı içerisinde yer alan düzenleme butonları.....	38
Resim 3.11 3D Doctor işlem ekranı.....	39
Resim 3.12 3D Doctor 3B oluşturma işlem adımı	39
Resim 3.13 3D Doctor Treshold ayar ekranı	40
Resim 3.14 3D Doctor 3B görüntü ama adımı.....	40
Resim 3.15 3D Doctor 3B görüntü	40
Resim 3.16 Mimics DICOM dosya aktarımı	41
Resim 3.17 Mimics yüklenen DICOM görüntülerinin yönlerini belirleme.....	41
Resim 3.18 Mimics programına yüklenen görüntülerin görünüşleri	42
Resim 3.19 Mimics Treshold ayar ekranı	43
Resim 3.20 Mimics 3B oluşan görüntü.....	43
Resim 3.21 Endüstriyel tip tarayıcı (KScan-Magic).....	44
Resim 3.22 Endüstriyel tip tarayıcı ile görsel işaretli insan Radius kemiğinin taranması	45
Resim 3.23 Endüstriyel tip tarayıcının kendine ait program ile 3B modellemesi	45
Resim 3.24 Radius kemiğinin vücuttaki yeri Radius kemiğinin vücuttaki yeri.....	47
Resim 3.25 İnsan Radius kemiğinin bölümleri bölümleri	48
Resim 3.26 İnsan Radius kemiğinin enine bölümleri	49

1. GİRİŞ

Makine Mühendisliği: ürünleri, yapıları ve sistemleri tasarlayan, üreten, inşa eden ve bakımını yapan özel bir alandır. Mühendislik disiplini: ileri mühendislik ve tersine mühendislik olarak ikiye ayrılabilir. İleri mühendislik, soyutlama ve mantıksal tasarımdan fiziksel gerçekleştirmeye doğru gelişen bir sistemdir. Problemden çözüme tüm mühendisler tarafından kullanılan ortak bir yol veya yöntemdir. Ancak bazı durumlarda bu yöntem zaman ve maliyet artışı gibi istenmeyen sonuçlara yol açmaktadır. Bu gibi istenmeyen sonuçlarda ise tersine mühendislik avantajlı sonuçlar elde etmemizi sağlamaktadır (Türkücü ve Börklü 2017).

Her geçen gün gelişmeye devam eden birçok bilim, problem çözme için yeni fırsatlar sunmuş ve sağladıkları aynı teknikleri kullanarak farklı bilimlerin aynı konu üzerinde çalışabilmelerine katkıda bulunmuştur. Çözümlerin hassasiyetinin arttığı mühendislikte ve çeşitli alanlarda tersine mühendislik kavramının önemi artmıştır. Tersine mühendislik kavramının temel amacı, üzerinde çalışılacak nesnenin mevcut olup olmadığına bakmaksızın nesnenin çalışma koşullarını iyileştirmek, nesneleri parçalara ayırarak çalışma ilkeleri öğrenilen bilgilerden en iyi şekilde yararlanılarak aynı nesneden seri bir şekilde yeniden üretebilmek amacıyla yapılan çalışmalar bütünüdür. Çok eski zamanlardan beri bilgisayar programlarının kullanılması nedeniyle tersine mühendislik kavramının kullanımı hızla artmaktadır. Tersine mühendislik kavramı sayesinde nesne üretilebilir, geliştirilebilir ve gerekirse tekrardan üretilebilmesi için nesne tasarım bilgisine ihtiyaç duymadan uzayda üç boyutlu sayısal içerik ile tasarım elde edilmesidir (Aksay 2017).

Tersine mühendisliğin temel uygulamaları şu şekilde sıralanabilir;

- Yeni bir parçanın tasarımı,
- Mevcut bir parçayı kopyalama
- Aşınmış veya hasarlı parçaları kurtarmak, onarmak ve yeniden tasarlamak,
- Modellerin doğruluğunu ve kesinliğini geliştirmek,
- Dijital modellerin doğrulanması (Saritaş, 2015)

CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programlarının kullanımının artmasıyla birlikte tersine mühendislik kavramı ivme kazanmış, Bilgisayar Destekli İmalat (CAM) ve 3D tasarım programları yardımıyla nesneleri ölçüp bilgisayarları kullanarak boyutlu bir model oluşturmuştur. Bu modelleri bilgisayar ortamında oluşturmak için görüntüleme teknikleri kullanılır (Aksay 2017).

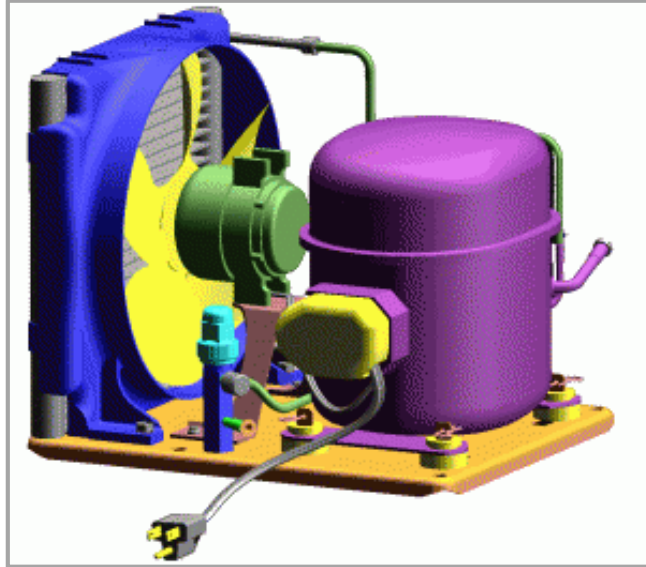
Tersine mühendislik yazılım sektörü, arkeoloji, eğlence sektörü, tekstil, heykellerin, protezlerin, mekanik parçaların vb. nesnelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca askeri ve biyomedikal alanlarda yani hassas modellemenin gerekli olduğu birçok alanda kullanılmaktadır (Fidan vd. 2022). Makine mühendisliğinde ise tersine mühendisliğin yaygın bir uygulaması, parçaların onarımıdır. Deforme olmuş mekanik elemanlar ve şekiller, tersine mühendislik teknikleri kullanılarak yeniden üretilebilir. Ayrıca geliştirilmekte olan ürünün tersine mühendislik uygulaması ile modeli eski haline getirir ve ürünü revize eder. Makinelerde tersine mühendisliğin bir başka kullanımı, seri üretilen ürünlerin BDT modellerini elde etmektir. Üretimde tersine mühendislik ile Bilgisayar Destekli Üretim teknolojisi kullanılarak yeniden üretilebilir. Bu amaçlara benzer şekilde literatürde birçok tersine mühendislik uygulaması bulunmaktadır (Haşcelik 2021).

Tersine mühendislik için yedek parça sektörü verilebilecek örneklerden biridir (Şekil 1.1). Gelir potansiyeli açısından ülkemizin en önemli sektörlerinden biridir. Başta otomobil parçaları olmak üzere yedek parça, her türlü makine, beyaz eşya vb. ürün yedek parçaları akla gelmektedir (Şekil 1.2). Tersine mühendislik yöntemi, yurt dışında üretilen ancak ülkemizde üretilmeyen bir parçayı imal etmek istediğinizde kullanabileceğiniz en iyi yöntemdir. Ayrıca, üretilen orijinal parçaların yüksek fiyatı, piyasada karşılaştırılabilir bir ürün için talep yaratmaktadır. Bu anlamda, satış sonrası üreticiler tersine mühendislik hizmetlerinden büyük ölçüde faydalanmaktadır.



Şekil 1.1 Otomotiv sektöründe yedek parça alanında tersine mühendislik (İnt. Kyn. 1).

Tersine mühendislik hizmetleri makine üreticileri için de çok önemlidir. Yurtdışında özel olarak tasarlanmış makine ve bileşenlerin teknolojisini yakalamak ve ilerletmek, günümüz imalat endüstrisinde rekabet edebilmek için esastır. Bu anlamda, makine üreticileri genellikle tersine mühendisliğe başvururlar (Tekeste 2020, Koordinat Ölçüm Makinaları).



Şekil 1.2 Beyaz eşya sektöründe yedek parça alanında tersine mühendislik (İnt. Kyn. 1).

Üretilen bileşenlerin ise taşınabilirliği ve maliyetleri de önemlidir. Örneğin otomotiv sektöründe kullanılan her bir bileşenin aracın ağırlığına yaptığı katkıdan dolayı yakıt ekonomisi de etkilenmektedir. Hem araç ağırlığını hem de enerji tüketimini azaltmanın

yolları araştırılmaktadır. Bunun yanında ayrıca normal parçaların üretim maliyetini azaltmak ve üretim hızlarını artırmak için de çok fazla kullanılmaktadır (Şahin 2018). Tersine mühendislik teknolojisi, tıbbi uygulamalarda hastanın kişiselleştirilmiş kemik modelinin oluşturulmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. BT taramaları, MRI ve 3B lazer tarayıcılar, Tersine mühendislik tekniklerini modelin dijital biçimlerini yakalamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Özsoy ve Kayacan 2018).

Tersine mühendislik teknikleri ile oluşturulan 3 boyutlu doku veya implant modellerinin doğru analizlerinin yapılması önemlidir. Yanlış tasarlanmış bir model hastaya geri dönüşü olmayan zararlar verebilir. 3B modelleme doğruluğu, 3B modellerin geometrik karşılaştırması için gerçek referans ölçümlerine dayanmaktadır. Ayrıca, 3B modelin doğruluğu, kullanılan yeniden yapılandırma tekniğine (algoritma, segmentasyon parametreleri, vb.), yüzey geometrisine ve görüntüleme protokolüne bağlıdır (Lalone vd. 2015). Yanlış planlanmış veya ölçülendirilmiş bir implant hasta hayatına mal olmaktadır. Bu alanda 3B modelleme için birçok program kullanılmaktadır. Ancak hangi programın hangi alanlarda geometrik olarak daha iyi sonuçlar verdiği çok daha önem arz etmektedir. Bu tez çalışmada amacımız BT cihazından alınan beş farklı insan Radius kemiğine ait görüntü verilerini farklı medikal programlarda işleyerek üç boyutlu modellerini oluşturulup bu modellerin kendi aralarındaki yüzeysel ve hacimsel farklılıklarını incelenmesidir.

Bu alanda yapılan çalışmalar genellikle medikal programlar vasıtasıyla oluşturulan 3B modeller üzerinedir. Programların hangisinin geometrik olarak daha doğru sonuçlar verdiği üzerinde duran çok az araştırma mevcuttur. Bu çalışma ile medikalde çokça kullanılan 3B modelleme programları üzerinde morfometrik karşılaştırmalar yaparak literatürde gördüğümüz bu boşluğu doldurmaya çalıştık.

olgun kavramları geliştirme gibi hedefler temelinde çalışır. Böylece sürekli iyileştirme, problem çözme, maliyet geliştirme, bilgi toplama gibi alanlarda mühendislik faaliyetlerinin yürütülmesine olanak sağlar. Ayrıca kalite kontrol, üretim planlaması ve üretim süreçleri için girdi verileri sağlamak için kullanılır (Delikbaş 2022). Ürünün bilgisayar destekli tasarım modeli olmamasına rağmen, gelecekteki çalışmalarda kullanılmak üzere bir nesnenin üç boyutlu 3B modeli başarıyla oluşturulmuştur. Sınırlı veri kullanarak doğru bir 3B model oluşturma'nın birkaç adımı vardır. Bu adımlar, sıralı veri toplama, taşıma ve oluşturmaya açıklar. Bu akış şeması tersine mühendisliğin temel prensibi olarak kabul edilebilir. Modelden ürüne mühendislik yaklaşımı, üründen modele ise tersine mühendislik yaklaşımı olarak tanımlanabilir (Demir 2018).

2.1 Tersine Mühendisliğin Günümüz Endüstrisinde Kullanım Sebepleri

Tersine mühendislik kavramı sektörde yaygınlaşmaya devam ettikçe kullanım alanlarıyla ilgili yeni gelişmeler ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında endüstrinin de ihtiyaçlarının artması tersine mühendislik kavramının kendi içerisinde gelişmesini sağlamaktadır. Tersine mühendisliğin endüstride nerelerde kullanılacağı hakkında aşağıda bazı durumlara yer verilmiştir (Demir 2018).

- CAD yazılımında tasarlanamayan karma geometrili ürünler oluşturmak için 3B modeller oluşturma ihtiyacı
- CAD yazılımı ile modellenmesi zor olan serbest çizgiler ve şekiller kısa sürede kolaylıkla oluşturulabilir.
- Teknolojinin gelişmesiyle birlikte özellikle tıp alanında yapılan protezler insanlara özel olarak tasarlanmakta ve yapılmaktadır.
- Orijinal nesnenin CAD modeli ile modele ve yapılacak ürüne göre yapılacak kalıp arasındaki uyumsuzlukların giderilmesi.
- Üretilen ürünlerin teknik analizlerini yaparak kaliteyi ve analizleri artırarak daha doğru üretimi sağlamak.
- Ürün tasarımında daha ergonomik tasarım, retro tasarım ve aerodinamik gibi alanlarda inovasyonu hızlandırmak.
- Orijinal ürün tasarımı yeterli dokümantasyona sahip değilse.

- Üreticinin geçmişte yapılmış ürünleri yeniden üretme isteği.
- Daha önce üretilmiş ürünler için üretim kayıtlarının kaybı.
- Ürünün kötü tasarımı nedeniyle yeniden tasarım ihtiyacı.
- Aynı üründen yeni ürünler üretilirken ürün uzun süre dayanacağından ürünün iyi ve kötü kalitesinin pekiştirilmesini sağlamak.
- Rakip ürünlerin teknik özelliklerini ve kalitesini analiz ederek kendi ürünlerinizin iyi ve kötü yanlarını karşılaştırabilmek.
- Ürün performansını ve kullanım özelliklerini iyileştirmek için yeni üretim ve tasarım yöntemlerinin keşfi.
- Rakip ürünleri anlayın ve daha iyi ürünler geliştirmek için yeni rekabetçi kıyaslama yöntemleri bulun.
- Orijinal bilgisayar destekli tasarım modeli, değiştirilmiş veya mevcut üretim süreci için yeterli değilse;
- Orijinal ürün üreticisinin yedek parça tedarik etme konusundaki yetersizliği veya isteksizliği.
- Yedek parça sağlamak için orijinal üreticiden alınan yüksek ücretler.
- Eskiye parçaların ve modası geçmiş üretim süreçlerinin en son ucuz teknoloji ile güncellenmesi. (Demir 2018).

2.2 Tersine Mühendislikte İşlem Basamakları

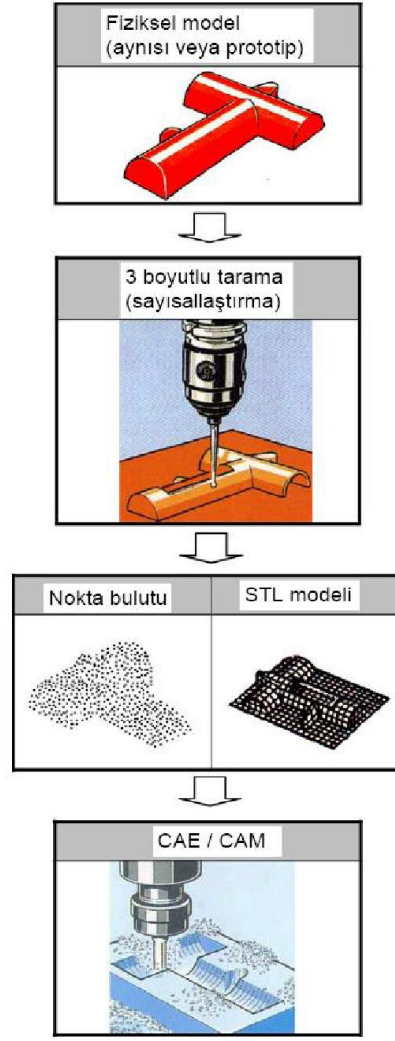
Her işlemde olduğu gibi tersine mühendislik için de basamaklar ve bu basamaklar arasında izlenmesi gereken bir sıra vardır. Genel çerçeveden bakıldığında bu basamakları veri toplama, verileri bilgisayar ortamında işleme ve model oluşturma olarak gruplayabiliriz.

Tersine mühendislikte, ürünün 3B CAD modelini oluşturmak için aşağıdaki sıra izlenir;

1. Ürün modeli tanımlanır
2. Uygun bir tarayıcı ile taranarak ürünün geometri verileri elde edilir
3. Bilgi, nokta işleme programına çağrılır
4. Ortaya çıkan nokta bulutları için kesme düzlemi yapılır
5. Nesne parçaları bir sıra tablosu ile tanımlanır

6. Farklı nesne kesitleri ardışık ilişki, yerine tutabilecek unsur tespit edilir
7. Nokta bulutlarının yeni biçim birimi oluşturulur
8. Ürünün yüzeyi yapılmıştır
9. Yüzey doğruluğu ölçülür
10. 3B model oluşturulur
11. İstenirse hızlı prototipleme makinesi kullanılarak ürün yapılır. (Boyette, 2004)

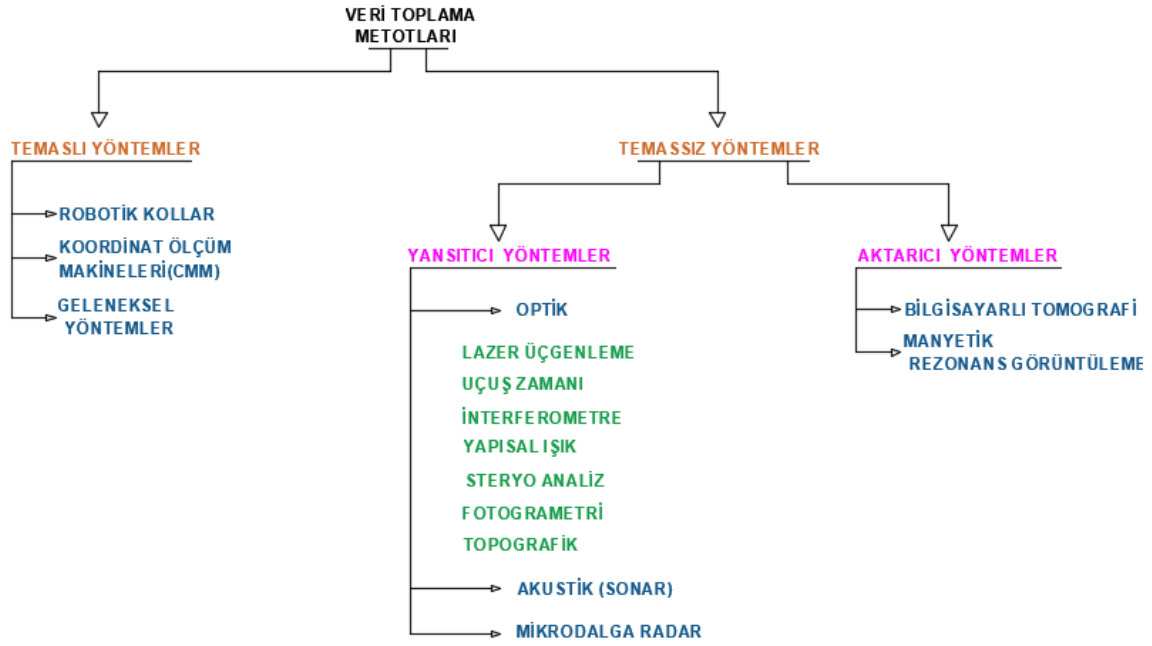
Tersine mühendislikte ilk amaç verileri olmayan fiziksel bir ürünün verilerini sanal ortama aktararak aynı ürünü sanal ortamda da oluşturmaktır. Resim 2.1'deki sıralama ile önce özel yazılımlarla 3B tarama yapılarak ürünün geometrik detayları elde edilmektedir. Nokta bulutu formatıyla geometrik verileri elde ettiğimiz ürünün STL ve 3B CAD modelinin oluşturularak ürünün hızlı prototipleme işlemi sağlanabilmektedir (Demir 2018).



Resim 2.1 Tersine mühendislik prosesi işlem basamakları (Demir 2018).

Ürün geometrisinde lazer tarama, radar uygulaması, nokta detektörleri, yüzey derinliğinin z ekseni verilerinin bulunması için kullanılan veri toplama yöntemleridir. Veri toplama sürecinin taraması sırasında bilinmeyen bir yüzey üzerinde analog tarama başlığı (temaslı veya temassız) ile her iki yönde tarama yapılmaktadır. Bu süreçte sistem yüzeydeki verileri sayısal veri olarak algılayarak nokta bulutu şeklinde bir matris oluşturulmaktadır. Bu yöntemlerle toplanan veriler sıralanmakta, analiz edilmekte ve model üretimi için hazırlanmaktadır (Demir 2018).

Tersine mühendislikte geometrik veriler sayısallaştırma işlemi ile elde edilmektedir. Sayısallaştırma işleminde kullanılan tarama cihazları temaslı ve temassız olarak iki ana grupta toplamak mümkündür. Şekil 2.2'deki gibi gruplayabiliriz.



Şekil 2.2 Tersine mühendislikte kullanılan veri toplama yöntemleri.

2.2.1 Temaslı Yöntemler

Temaslı veya dokunmalı sistemlere probu sistemlerde denilebilir. 3 farklı yöntemi vardır;

1. Robotik (Mekanik) Kollar
2. Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM)
3. Geleneksel Yöntemler

Temassız ölçüm sistemlerinde daha hassas ve doğru sonuçlar için probur (iğne, pim) kullanılmaktadır. Ancak işlem hızları çok yavaştır. Ayrıca, prob hassas yüzeylere zarar verebilmekte, çok sıcak ve çok soğuk yüzeyler ise proba zarar verebilmektedir. Modelin geometrisi karmaşık ise doğru ölçümler yapmak için modelden alınması gereken noktaların sayısı artmakta ve nokta verilerinin toplanması günler hatta haftalar alabilmektedir (Demir 2018).

2.2.1.1 Robotik (Mekanik) Kollar

Parça yüzeyinden ölçüm yapmak için kullanılan probu konumlandırmak için gövdeye bağlı hareketli bir kol kullanılır. Prob olan lm kolunun ucunda elmas kadar sert bir top vardır. Bu kre model yüzeyinde koordinatlarını belirleyen bir noktaya değdiğinde modelin geometrik ve yüzey koordinatları olan x , y , z değerleri 3 boyutlu uzayda elde edilerek bilgisayara gönderilir. Böylece o noktanın koordinat bilgisi elde edilmiş olur. Probun parçanın yüzeyine dokunabilmesi ve ölçülen değeri okuyabilmesi için hareketli kolun her bir parçasının özellikleri (uzunluk, dönüş sayısı vb.) bilinmelidir. Bu sistemde modelin yüzey topoğrafyası bilgisi yerine model üzerinde istenilen sayıda nokta koordinat verisi alınabilmektedir. Resim 2.2'deki gibi çok eksenli hareketli kol, ölçüm alanının farklı noktalarından ve aılarından ölçüm yapmayı kolaylaştırır (Işık 2020).



Resim 2.2 Robotik (mekanik) kol (Işık 2020).

2.2.1.2 Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM)

Koordinat ölçüm teknolojisinin gelişimi 1970'li yılların başında görülmektedir. Bu tarihe kadar koordinat ölçüm cihazlarının laboratuvarlarda kullanımı sınırlıdır. Günümüzde koordinat ölçüm cihazları modern imalat teknolojisinin en önemli bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

Ağırlıklı olarak yüksek hassasiyet gerektiren ürünlerde kullanılmaktadır. Koordinat ölçüm makinesi (CMM) en doğru ölçüm cihazıdır. Bu cihazlar, ölçülecek modelin yüzeyinde belirli bir yol izleyerek son derece hassas veriler toplamak için ürünün önceden tanımlanmış yüzey geometrisini örnekleyerek NC programlanabilir makinelerle programlanabilmektedirler. Örneklem ilkesi, CMM kullanarak bir modeli ölçmenin ve kontrol etmenin tek yoludur. Ölçülecek modelin yüzeyinden büyük miktarda nokta verisi elde etmek için yüksek kaliteli bir kontrol cihazı gerekmektedir. Bu gereksinime ek olarak, modelin geometrik yüzeyinin düzgün olması önemlidir (Demir 2018). Genel olarak gövde tiplerine göre 4 sınıfa ayrılırlar;

2.2.1.2.1 Köprü Tipi CMM Cihazı

Resim 2.3'deki köprü tipi en yaygın CMM'dir. İki dikey sütunlu granit yüzden oluşmaktadır. Bu sütunlar köprü adı verilen kısmı destekler. Köprü, dikey olarak hareket eden ölçüm sistemini destekleyen bir Z eksenli sütununu destekler. Her türlü parçayı ölçmek için kullanılabilen cihazlardır (Işık 2019).



Resim 2.3 Köprü tipi CMM cihazı (İnt. Kyn. 2).

2.2.1.2.2 Dört Kolonlu Tip CMM Cihazı

Resim 2.4'deki dört sütunlu bir CMM makinesi, uçaklar, trenler ve türbinler gibi büyük ve ağır parçaları ölçmek için kullanılan bir makinedir. Kızak veya taşıyıcı araba sistemleri ile ölçüm parçası cihazın merkezine yerleştirilir. Adından da anlaşılacağı gibi dört sabit sütun üzerine yerleştirilmiş bir kızak üzerinde hareket eden köprü yapısına sahiptir (Işık 2019).



Resim 2.4 Dört kollu tip CMM cihazı (Işık 2019).

2.2.1.2.3 Dirsek Tip CMM Cihazı

Resim 2.5'deki dirsek tip CMM delme makinelerine ve dikey freze makinelerine benzemektedir. Açık gövde yapısı sayesinde ölçülecek parçayı cihaza yükleyebilme ve parçaya ulaşabilme avantajı sunan cihazlardır. Genellikle masterların ve ana parçaların hassas ölçümü için kullanılmaktadır (İnt. Kyn. 3).



Resim 2.5 Dirsek tip CMM cihazı (Işık 2019).

2.2.1.2.4 Yatay Kol Tip CMM Cihazı

Resim 2.6'daki yatay kol tip CMM yerleşim makinesi olarak da adlandırılmaktadır. Hareket edebilen bir kolu vardır ve prob y eksenini boyunca taşınmaktadır. Geniş ve engelsiz bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Otomobil parçalarının ölçümü için idealdir (İnt. Kyn. 4).



Resim 2.6 Yatay kol tip CMM cihazı (Işık 2019).

2.2.1.3 Geleneksel Yöntem

Kumpas ve açılörler gibi araçlarla manuel olarak ölçüm yapılarak çeşitli CAD programları kullanarak ürünün yeniden modellenmesidir. Daha çok basit yapıli nesneler için kullanılmaktadır.

2.2.2 Temassız Yöntemler

Temassız veri toplama yöntemleri, modelin geometrisini üç boyutlu bir ortamda oluşturmak için modele dokunmadan sabit bir mesafede ışık, ses ve manyetik alanlar kullanarak gerçekleştirilmektedir. Model ürüne dokunmadan yüzey topoğrafyasını yakalayan sistemlerdir (Işık 2020). Temassız sistemler kullanarak serbest biçimli yüzey bilgisinin elde edilmesi, tasarım ve ürün geliştirme, kalite kontrol, kalıplama vb. alanlarda ayrıca ürün geliştirme, tersine mühendislik ve kalite kontrol süreçlerinde uzmanlaşmış mühendislik firmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler ile tüm yüzeyin geometrisi, CAD model oluşturmaya, hızlı prototip oluşturmaya ve CNC işlemeye hazır ve çok yüksek doğrulukla elde edilmektedir (Bursa Teknik Üniversitesi, Tersine Mühendislik Deney Föyü). Temassız veri toplama sensörleri, temaslı veri toplama sensörlerinden çok daha ucuzdur ancak veri toplama işlemi sırasında her seferinde işlemin durdurulması ve model ürünün yeniden konumlandırılmasından kaynaklanan zaman kaybı ihmal edilebilir düzeydedir (Demir 2018).

2.2.2.1 Yansıtıcı Yöntemler

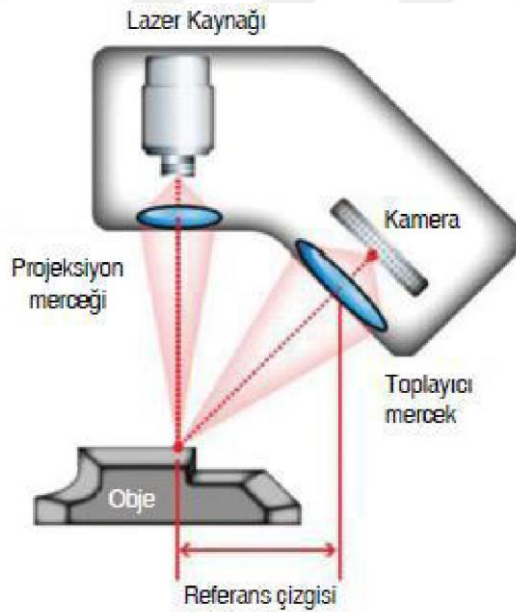
2.2.2.1.1 Optik Yöntemler

Optik tarama ekipmanı, belirli bir alanı tarayarak yüzey bilgilerini bir nokta bulutu şeklinde toplamaktadır. Elde edilen bu nokta bulutu, taranan yüzey hakkında yorum yapmamızı sağlamaktadır. Tarama sonrasında kullanılan veriler ile numunenin geometrik özelliklerini tespit edip kontrol edilebilmektedir. Ayrıca elde edilen nokta bulutu kullanarak örneğin üç boyutlu modelinin oluşturulması da mümkündür. Elde edilen modeller sayesinde boyutsal kalite kontrol, analiz ve simülasyon gibi uygulamalar

gerçekleştirilebilmektedir. Tarama cihazları tıpkı CMM cihazlarında olduğu gibi üretim aşamalarında kullanılmaktadır (Işık 2019). Genel olarak çalışma prensiplerine göre 7 sınıfa ayrılırlar;

2.2.2.1.1.1 Lazer Üçgenleme

Resim 2.7'deki düzenek en yaygın kullanılan optik ölçüm yöntemi lazer taramadır. Bu yöntemin avantajları arasında, bir defada daha fazla noktayı kaydetme yeteneği, daha yüksek ölçüm hızı ve CMM problemleri kullanılarak yapılan ölçümlere kıyasla otomasyon kolaylığı yer almaktadır. Lazer tarama, taranan yüzeye bir tür ışın veya ışık gönderilmesini ve yansımalarının ölçülmesi ile yapılmaktadır (İnt. Kyn. 5).



Resim 2.7 Lazer üçgenleme yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.1.2 Uçuş Zamanı

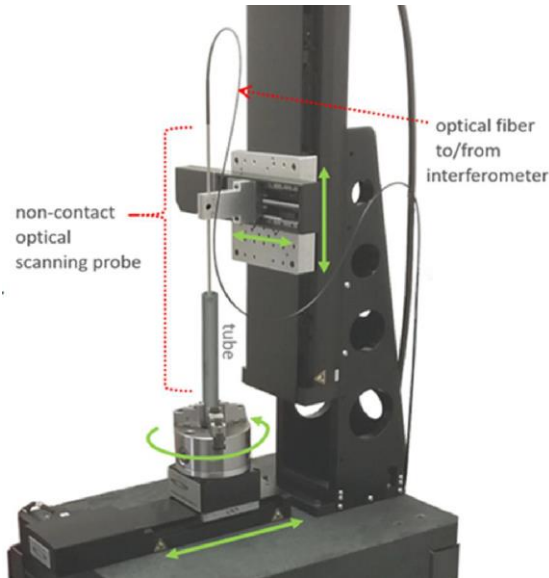
Resim 2.8'deki alet bir nesneyi incelemek için lazer ışığı kullanan aktif bir tarayıcıdır. Bu tür tarayıcıların merkezinde bir uçuş süresi lazer telemetre bulunmaktadır. Lazer telemetre, bir ışık darbesinin gidiş-dönüş süresini ölçerek bir yüzeye olan mesafeyi belirlemektedir. Bir ışık darbesi yaymak için lazer kullanılmakta ve yansıyan ışığın dedektörde görünmesi için geçen süre ölçülmektedir (Abdel ve Ebrahim 2015).



Resim 2.8 Uçuş zamanı yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.1.3 İnterferometre

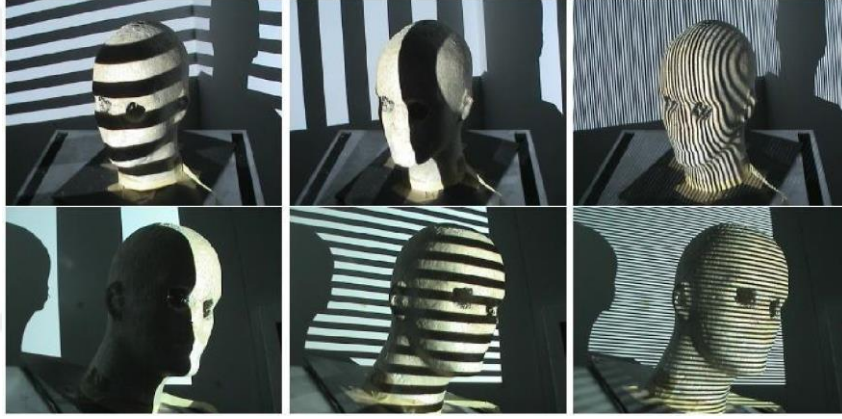
Bu yöntem, dalga boyundaki mesafeyi hesaplamaktadır. Bu çok hassas bir yöntemdir çünkü görünür ışık yüzlerce nanometre boyutunda olmasına rağmen, diğer tersine mühendislik uygulamalarında mesafe santimetre ve metre hassasiyetindedir. Prensip olarak, elektromanyetik spektrumun diğer kısımlarından da yararlanılmaktadır. Uygulamada, hem nesne algılama için kullanılan monokromatik ışın için hem de yansıyan ışıkla karşılaştırma için referans ışın sağlamak için yüksek enerjili bir ışık kaynağı kullanılır (Resim 2.9) (İnt. Kyn. 5).



Resim 2.9 İnterferometre yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.1.4 Yapısal Işıklandırma

Bir dizi fotoğraftan oluşturulan ana hatlar, iyi kontrastlı bir arka plana karşı üç boyutlu bir nesnenin etrafında kullanılmaktadır. Desenli projektörden biraz uzağa yerleştirilmiş bir kamera, çizginin şeklini gözlemleyecek ve çizgi üzerindeki her bir noktaya olan mesafeyi hesaplamak için üçgen yöntemine benzer bir teknik kullanacaktır. Resim 2.10'daki gibi iki boyutlu desene örnek olarak ızgara veya şerit desen verilebilmektedir. Kamera, çizgi desenindeki farkı gözlemlemek için kullanılmakta ve algoritma, desendeki her nokta için mesafeyi hesaplamaktadır. Bir dizi paralel, dikey lazer ışını hedefe yatay olarak düşürülmektedir (Demir 2018, Yalçinkaya vd. 2019).



Resim 2.10 Yapısal ışıklandırma yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.1.5 Stereo Görüntü Analizleri

Genellikle aynı sahneye bakan iki özdeş video kamera olmaktadır. Resim 2.11'deki gibi her kameranın gördüğü görüntüler arasındaki küçük farklar analiz edilerek görüntülerin her noktasındaki mesafe belirlenmektedir (Yalçinkaya vd. 2019).



Resim 2.11 Stereo görüntü analiz yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.1.6 Fotogrametri Yöntemi

Genellikle dijital tek bir kamera kullanılmaktadır. Bu prensibe göre nesneler, işaretleyici adı verilen, sisteme önceden tanıtılan karakterlerle işaretlenir (Resim 2.12). Ölçeklendirmeyi sağlamak için nesnenin uygun konumuna kalibre edilmiş bir çubuk yerleştirilmektedir. Ardından nesnenin pozunu farklı açılardan çekilmektedir. Yakalanan poz işaretleyici bilgisi bir bilgisayar programı tarafından işlenmekte ve ancak, farklı aydınlatma koşullarında birden çok görüntü yakalanır. Bilgi işleme aşamasında, işaretleyicilerden elde edilen koordinat verileri kullanılarak nokta bulutu verileri elde edilir (Işık 2019, Yalçınkaya vd. 2019).



Resim 2.12 Fotogrametri yöntemi (Işık 2019).

2.2.2.1.1.7 Topografik Yöntem

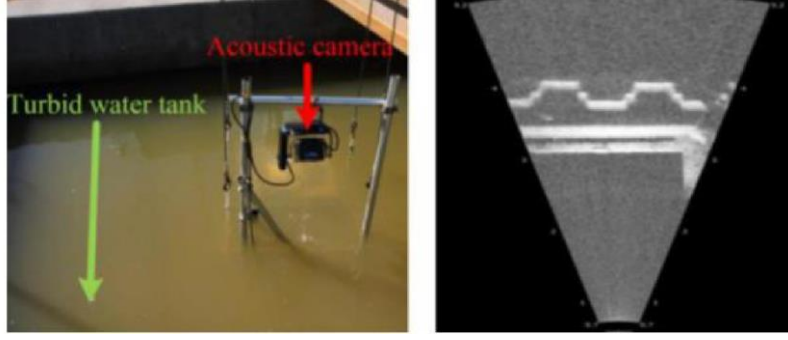
Topografik ölçüm prensibi ile çalışan optik tarama sistemleri, hassas ve nispeten küçük parçaların ölçümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler projektör ve kamera kombinasyonu ile çalışmaktadır. Tek kameralı ve çift kameralı versiyonları bulunmaktadır. Bunlar konik bir görüş alanındaki ölçüm sistemleridir. Farklı görüş alanları, aynı anda elde edilen ölçüm yüzeyinin doğruluğunu veya hacmini belirlemeye izin vermektedir (Resim 2.13) (Işık 2019).



Resim 2.13 Topografik yöntemi (Demir 2018).

2.2.2.1.2 Akustik (Sonar) Yöntemi

Akustik yöntem, yüzeyden yansıyan sesi kullanmaktadır. Akustik yöntemler yüzyıllardır mesafeyi ölçmek için kullanılmaktadır. Sonar sistemlerde bu amaç için kullanılmaktadır. Otomatik odaklı kameralar da akustik yöntemleri kullanmaktadır. Bu yöntem, uçuş süresi yöntemine benzer şekilde ses dalgalarının yüzeylerden yansımalarını kullanır ve ses kaynağı ile yüzey arasındaki mesafeyi ölçmek için ses hızı bilgisini kullanmaktadır (Resim 2.14). Akustik karışıklıklar veya gürültü genellikle netleme noktasının bulunmasını zorlaştırmaktadır. Dinamik görüntüleme, ultrason ekipmanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dinamik görüntüleme, bir dönüştürücü ile bir enine kesiti tarayarak bir nesnenin iç malzeme yapısı elde edilebilir (İnt. Kyn. 5).



Resim 2.14 Akustik (sonar) cihazı çalışma şekli (Işık 2020).

2.2.2.1.3 Mikrodalga Radar Yöntemi

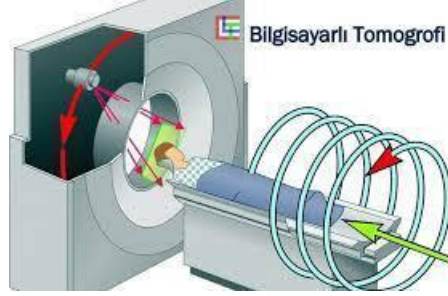
Manyetik Mikrodalga'nın dalga boyu 1 m ila 1 mm'dir. Mikrodalga elektrik enerjisinden ve 100 cm veya 300 MHz ila 0,1 cm veya 300 GHz frekanslardan oluşmaktadır. Mikrodalgalar elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılmaktadır. Bir tür elektromanyetik enerji olan mikrodalga enerjisi, iyonların hareketi veya dipollerin dönme hareketi yoluyla moleküller arası geçişleri iyonize olmayan radyasyon türüdür. Mikrodalgalar Birçok üründe kullanılmaktadır. Bunlar; radar, fırın, cep telefonu, kablosuz ağ, kulaklık vb. (Ahmad 2019). Elektromanyetik dalgaların radarda kullanılmasının nedeni, elektromanyetik dalgaların yayılmak için maddeye ihtiyaç duymamasıdır. Bu özelliklerinden dolayı uzay ve dünya dışı görevlerde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Ayrıca elektromanyetik dalgaların uzaydaki sabit hızları bize hesaplama ve bağlantıda büyük kolaylık sağlamaktadır. Elektromanyetik dalgaların boşluktaki hızı ışık hızına eşittir ve saniyede 299.792.458 metredir. Bu sabit c sembolü ile gösterilir (İnt. Kyn. 6).

2.2.2.2 Aktarıcı Yöntemler

2.2.2.2.1 Bilgisayarlı Tomografi

Bilgisayarlı tomografi (BT), 3 boyutlu rekonstrüksiyon için güçlü bir aktarıcı yaklaşımdır. Aynı zamanda bilgisayarlı eksenel tomografi (CAT), bilgisayarlı transaksial tomografi (CTAT) ve dijital eksenel tomografi (DAT) olarak da adlandırılır. Tek bir dönme eksenini etrafında çekilmiş geniş bir dizi 2 boyutlu X-ışını kesit görüntüleri

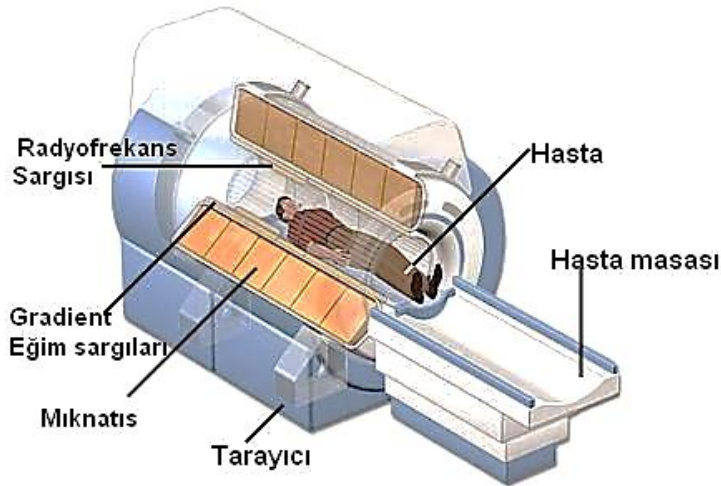
sağlar. Tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Resim 2.15) (Raja ve Fernandes, 2009).



Resim 2.15 Bilgisayarlı Görüntüleme Cihazı (İnt. Kyn. 7).

2.2.2.2 Manyetik Rezonans Görüntüleme

Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) manyetik alanları ve radyo dalgalarını kullanan son teknoloji bir görüntüleme teknolojisidir. Radyasyon kullanmadan vücudun yüksek kaliteli, kesitsel görüntülerini oluşturmak için kullanılmaktadır. İnsan vücudundaki hidrojen protonları güçlü bir radyasyona maruz kaldığında manyetik alan, elektromanyetik radyo frekansı göndererek (ve durdurarak) bu protonlar sinyaller yayar. Bu sinyaller toplanır ve işlenerek kesitsel görüntüler oluşturmaktadır (Resim 2.16) (Raja ve Fernandes, 2009).



Resim 2.16 Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazı (İnt. Kyn. 8).

2.3 Tersine Mühendislik Yönteminin Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleme Cihazı ile Uygulanması

Tomografi kelimesi Yunanca "tomos" (kesit) ve "grafia" (görüntü) sözcüklerinden oluşmaktadır. Bu nedenle bilgisayarlı tomografi vücudun bir kesitinden görüntü elde etme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bilgisayarlı Tomografi cihazlarında da klasik röntgen görüntülemesinde olduğu gibi X-ışınları kullanılmaktadır. Ancak bilgisayarlı tomografi cihazındaki x-ışını tüpü cihazın hareketli olan tünel şeklindeki halka kısmında (gantri kısmı) bulunmaktadır (Genç 2016).

2.4 Bilgisayarlı Tomografinin Tarihçesi

1895'te X-ışınlarının kullanılmaya başlanması doktorların hasta vücudunun içini kesi yapmadan görmelerine izin vermesi tıbbi teşhiste devrim yaramıştır. Ancak, X-ışınlarının sınırlamaları vardı. İki boyutlu bir projeksiyon kemikleri vurgular, bu tümörleri ve diğer yumuşak dokuları gölgeleyerek kemiklerin arkasındaki sorunları (kurşun gibi) tespit etmeyi zorlaştırmaktadır (Amar 2021).

Yenilikçi doktorlar daha sonra 1910'lardan 1960'lara kadar "tomografi" tekniğini geliştirmişlerdir. Bu teknik, hastanın etrafına birden fazla açıdan X-ışınları göndererek vücudun belirli bölümlerinin veya "dilimlerinin" görüntülerini oluşturmuştur. Ancak tomografi, hastaları yüksek dozda radyasyona maruz bırakmıştır. Geleneksel radyografilere benzer şekilde, tomografik radyografiler, tümörler gibi bitişik yumuşak doku ile kafatası içindeki sağlıklı dokuyu net bir şekilde ayırt edememiştir (Amar 2021).

1950'lerin başında, o dönemde Cape Town Üniversitesi'nde çalışan Güney Afrikalı fizikçi Allan MacLeod Cormack, X-ışınlarının dokulara nüfuz etme kabiliyetinin dokuların farklı yoğunlukları nedeniyle azaldığını varsayarak, X-ışını radyasyonunun çeşitli dokular tarafından emilmesi üzerine araştırmalarına başladı. Cormack, 1956 yılında Harvard Üniversitesi'nde çalışmak üzere Amerika Birleşik Devletleri'ne taşındığında, çalışmalarına devam etti ve çeşitli dokular için ortalama radyasyon emilim oranlarını belirledikten sonra, insan vücudunun içinin çok boyutlu, ayrıntılı görüntülerini elde etmek

için matematiksel bir yöntem oluşturmaya çalışılabileceği sonucuna vardı. Birkaç yıl teorik modeller oluşturduktan sonraki on yılın başında, nihayet 1963 yılında inşa edilen bir prototip cihaz üzerinde çalışmaya hazırıldı. Cormack deneylerinin sonuçlarını yayınlamış olsa da bunlar fazla dikkat çekmedi (Gryglewski 2016).

Dört yıl sonra, Cormack'tan bağımsız olarak çalışan Godfrey Newbold Hounsfield 'deki Merkezi Araştırma Laboratuvarları'nda tomografi üzerine araştırmalarına başladı, başlangıçta gama ışınlarının özelliklerini test etti. Ayrıca karmaşık hesaplamalar için mevcut bilgisayarları kullanmaya karar verdi. İlk bilgisayarlı tomografi bu şekilde geliştirildi, ancak o zamanlar bu makine yapı bakımından oldukça kusurluydu ve performans açısından güvenilmezdi. Bununla birlikte, bu cihaz 1968'de patenti alınan bilgisayarlı tomografi çağını başlattı (Gryglewski 2016). Bilgisayarlı tomografinin ilk başarılı klinik uygulaması 1967 yılında G. Hounsfield tarafından yapılmış ve 1971 yılında hastanelerde kullanılmaya başlanmıştır (Osman 2015).

2.5 Bilgisayarlı Tomografinin Çalışma Prensibi

Vücudun derinlemesine görüntüsü (Z boyutu) Hastalıkların teşhis ve tedavisi için çok önemlidir. Bu nedenle bilgisayarlı tomografi tarayıcıları geliştirilmiştir. (Uslu 2006)

Ayrıca endüstride de bu görüntüleme teknikleri mühendisler ve araştırmacılar için, Tahribatsız Muayene Deneylerinde (NDT), malzemenin iç yapısını, boyut ölçümünü, yoğunluk hesabını ve karmaşık parçaların mekanik montajlarının analizinde kullanılan yöntemler arasında, önemli bir konuma sahiptir (Uslu 2006).

Bilgisayarlı tomografi, X-ışınları kullanılarak vücudun incelenen bölgesinin kesitsel (dikey, koronal, enine düzlem) görüntüsünü oluşturmak için kullanılan bir dijital görüntüleme yöntemidir. Klasik röntgen filmlerinde görülmeyen yumuşak doku detayları BT görüntülerinde görülebilmektedir. Röntgen makinesi ile elde edilen görüntüler için derinlemesine detay elde edilememektedir. Bu nedenle görüntülerde organlar üst üste binmiş şekilde görüntülenmektedir. Ancak BT'de üç boyutlu görüntüleme yapıldığı için burada elde edilen görüntüler kesitsel olarak üretilebilmektedir. Böylece tüm organlar ve oluşumlar tüm detaylarıyla görülebilmektedir (Genç 2016).

Görüntüleme için, röntgende olduğu gibi, dokudaki fotoelektrik etkiyi soğuran bir mekanizma kullanılmaktadır. Yani X-ışınları atom numarası yüksek bölgelerde (kemik gibi yoğun dokular) daha fazla tutulurken, atom numarası düşük ortamlarda (akciğerler gibi daha az yoğun dokular) daha az radyasyon tutulur. Böylece BT dedektörleri içinden geçtikleri dokuların yoğunluğu ile ters orantılı olan radyasyonu algılar ve vücudun doku yoğunluğuna uyum sağlayan bir radyasyon haritası elde eder. Bu radyasyon şiddeti haritasını elde etmek için X-ışını tüpü hastanın etrafında 360 derece dönerken X-ışınlarını dar bir ışın olarak vücuda gönderir. Röntgen ışınları hem vücuda gönderilmeden önce hem de vücuttan geçtikten sonra ölçülür. Dokuya girmeden önce gönderilen X ışınlarının miktarı ile dokudan ayrılarak dedektöre ulaşan ışınların miktarı doku bozulma oranını verecektir. Bu işlem edinim sırasında birkaç kez tekrarlanır ve düşme hızı bilgisayar belleğinde her doku için ayrı ayrı depolanır. Bu nedenle BT görüntüleme yöntem olarak transmisyon (geçme) prensibine dayanmaktadır. Transmisyon prensibinde gönderilen enerji vücuttan geçerek diğer taraftaki dedektör tarafından algılanmaktadır. Yani kaynak ve alıcı farklıdır (Genç 2016).

2.6 Diğer Görüntüleme Yöntemlerine Göre Avantajları

- Görüntüler bilgisayar ortamına aktarılabilir ve görüntü bir görüntüleme programı ile ayarlanarak istenilen bölge daha iyi incelenebilir ve 3 boyutlu görüntü elde edilebilir.
- Herhangi bir doku veya lezyonun yapısını anlamaya yardımcı olur, yumuşak dokunun elektronik yoğunluğunu ölçebilir.
- BT taraması hızlıdır ve girişimsel olmadığı için hastaya kolayca uygulanabilir.
- Hızlı tarama özelliği, travma hastaları için önemli bir avantajdır. Bu hastalarda çok kısa sürede tüm vücut taraması yapılabilir.
- Sinirler, kan damarları, yumuşak dokular ve kemikler gibi farklı yapıların eş zamanlı görüntülenmesi elde edilebilir.
- Ağrısız ve oldukça hassas bir görüntüleme yöntemidir.
- Hasta hareketinden MRG'ye göre daha az etkilenir.

Diğer Fotoğrafçılık Yöntemlerine Göre Dezavantajları

- Geleneksel radyografik tekniklerden daha yüksek radyasyon dozu
- Parçalar arası mesafe fazla ise kalan bölgeden dolayı bilgi kaybı yaşanabilir.

- BT taramasında yoğun kemik dokusuyla çevrili yumuşak doku dokuyu görselleştirmek daha zordur.
- Artifaktlar meydana gelebilir (Gülöksüz 2016).

2.7 Tersine Mühendislik Yönteminin Kullanıldığı Alanlar ve Yapılan Çalışmalar

Tersine mühendislik ve geleneksel mühendislik düz bir yolda zıt yönlerde doğru yürüyen iki kişi gibidirler yani tersine mühendislik geleneksel mühendisliğin uygulandığı her alanda uygulanabilir. Günümüzde birçok literatür araştırmasına da konu olmuş olan tersine mühendislik özellikle 2B ve 3B tarama ve bu yolla sanal ortama aktarılmış dokümantasyon çalışması mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı uygulama alanlarının daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıda verilmiştir.

2.7.1 Eğitim

Eğitimde bazen verilen bilgiler yetersiz kalmaktadır. Bilgileri destekleyici farklı yaklaşımlar veya materyaller gerekmektedir. Tümden gelim metodu kullanılarak tersine mühendislik uygulamaları eğitimin daha anlaşılır olmasına katkı sağlamaktadır. Mühendislik, tıp ve birçok eğitimde bu uygulamanın önemi yüksektir.

Bertoni, Öğrencilerin mühendislik eğitiminde sistemlerin karmaşık yapısını anlamakta zorlandıklarını ve deneyim eksikliği yaşadıklarını bildirmektedir (Bertoni 2019). Ulrich ve Eppinger, ürün geliştirme sürecini tersine mühendislikle destekleyerek, dönem sonunda öğrenci geri bildirimlerine dayalı uygulamalı öğrenmeyi yaygınlaştırmayı ve teşvik etmeyi kolaylaştırdığını bildirmektedir (Akerdad vd. 2020).

Tersine mühendislik uygulamalı eğitimlerde karşı tarafın aldığı bilgileri daha anlaşılır bir hale getirmenin yanı sıra gerçek hayatta yapılacak olan uygulamanın risklerini öncesinde yapılan uygulamalar sayesinde daha da düşürmektedir.

2.7.2 Ürün Geliştirme

Bir nesnenin tersine mühendislik ile elde edilen datalarını veya bilgisayara aktarılmış olan

3B modellenmiş şekillerinin üstünde oynama yaparak, eksik veya hatalı kısımlarını düzelterek gene tersine mühendislik ile elimizde var olan nesne geliştirilmiş olmaktadır (Resim 2.17).

3B tarayıcılar kullanılarak ürünlerin düzenlenmesi, yeniden tasarlanması, geliştirilmesi ile ürün geliştirme ve prototiplemeyi hızlandıran, parçaları birbirine bağlayan bu teknoloji kullanılarak elde edilen verilerin doğruluğu üzerine araştırmalar yapmıştır. Bu yaklaşımla uyum hatalarının azaldığını ve ciddi zaman tasarrufu sağladığını ortaya koymaktadırlar (Kumar vd. 2018).



Resim 2.17 Tarayıcı ile üründen alınan nokta bulutu ve 3B boyutlu çizim (İnt. Kyn. 9).

Eğitim bölümünde de ayrıca Akerdad ve diğerleri, tersine mühendisliği ürün geliştirmeye entegre eden ve bunu ürün geliştirme ve eğitime uygulayan bir iş akışı oluşturarak sonuçları göstermişlerdir. Akedad ve diğerleri, iş akışı diyagramı metodolojisini kısaca şu şekilde açıklamaktadır; “Planlama aşamasında, fikirler, mevcut ürün fırsatları veya ihtiyaçlar, fikir üretme metodoloji tarafından belirlenir. Tersine mühendislik aşaması, tasarımın test edileceği, analiz ve işlevsellik, iş akış şemaları gibi detayların ortaya çıkacağı kısımdır. Konsept geliştirme aşamasında, bir önceki aşamada elde edilen verilerin müşteri ihtiyaçları ve işlevselliği gibi özellikleri Pugh yöntemi (Bu yöntemde karşılaştırma sırasında herhangi bir sayısal hesaplama yapılmaz. Referans kavram olarak bir kavram seçilir ve diğer kavramlar bu referans kavramla karşılaştırılır.) ile karşılaştırılır. Bu adım aynı zamanda geometrik özelliklerin bilgisayar ortamında işlendiği adımdır. Detaylı tasarım aşamasında, tasarlanan ürünün malzemeleri ve geometrik özellikleri oluşturulur. Test ve iyileştirme aşaması, alfa ve beta prototiplerinin oluşturulduğu, istenen işlevselliğe uygunluklarını doğrulamak için testlerin yapılabildiği

aşamadır” (Akerdad vd. 2020).

2.7.3 Otomotiv

Geriye dönüp baktığımızda otomobil üreticileri, on yıllar boyunca otomotiv tasarımında altı etkili akım görülmüştür:

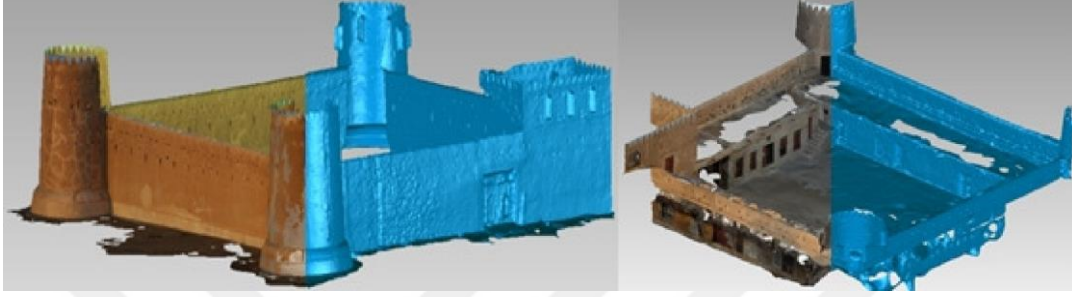
1. Kanıtlanmış bir tasarımın yeniden yapılandırılması olan atsız arabanın icadı;
2. Henry Ford'un seri üretim sisteminin hızı ve üretkenliği Chicago et paketleme endüstrisinden yeniden tasarlandı;
3. General Motor'un başkanı Alfred Sloan'ın daha çeşitli ürün modelleri sunarak bireysel müşterilerin isteklerine hitap etme girişimi seri üretim sınırları içinde;
4. Üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla standart ve değiştirilebilir parçalar üretmek için çok çeşitli kalite güvence yöntemlerinin kullanılması; ve
5. Müşterinin her şeye sahip olma arzusunun yerine getirmeye çalışmak
6. Seri üretim ekonomisi, bireyin zevkine ve ihtiyaçlarına uygun tasarım seçenekleri ve mümkün olan en yüksek kalite.

Tersine mühendislik yöntemlerinin, montaj hattının seri üretim için olduğu kadar bu beş aşamanın da anahtarı olduğu ortaya çıkmıştır. Modern otomotiv endüstrisi tersine mühendisliği şu temel nedenlerle kullanmaktadır:

- a. CAD yazılımında modellenmesi zor olan serbest biçimli şekiller oluşturmak için;
- b. Veri alışverişi ve veri bütünlüğündeki engelleri aşmak için;
- c. CAD modeli olmayan karmaşık geometriler oluşturmak için;
- d. CAD ana modeli ile gerçek takımlama veya inşa edilmiş parça arasındaki tutarsızlıklardan kaynaklanan sorunları çözmek ve düzeltmek;
- e. CAD modellemenin genellikle gereksiz bir adım eklediği ergonomik tasarım, retro esintili tasarım, yanma tasarımı ve aerodinamik gibi alanlarda inovasyonu hızlandırmak
- f. Bilgisayar destekli denetim yoluyla kalite ve performansı sağlamak ve mühendislik analizi (Raja ve Fernandes 2009).

2.7.4 Restorasyon

Katar İslami ve Arkeolojik Miras projesinin bir parçası olarak Hafen City Üniversitesi, Resim 2.18'deki Al Zubarah Kalesi'ni yer tabanlı görüntüleme ile başarıyla belgelemiş ve diğer yazılımlarla değerlendirmiştir (Kersten vd. 2015).



Resim 2.18 Al Zubarah kalesinin dış duvarlarının (solda) ve iç alanının (sağda) 3 boyutlu yüzey modeli (Kersten vd. 2015).

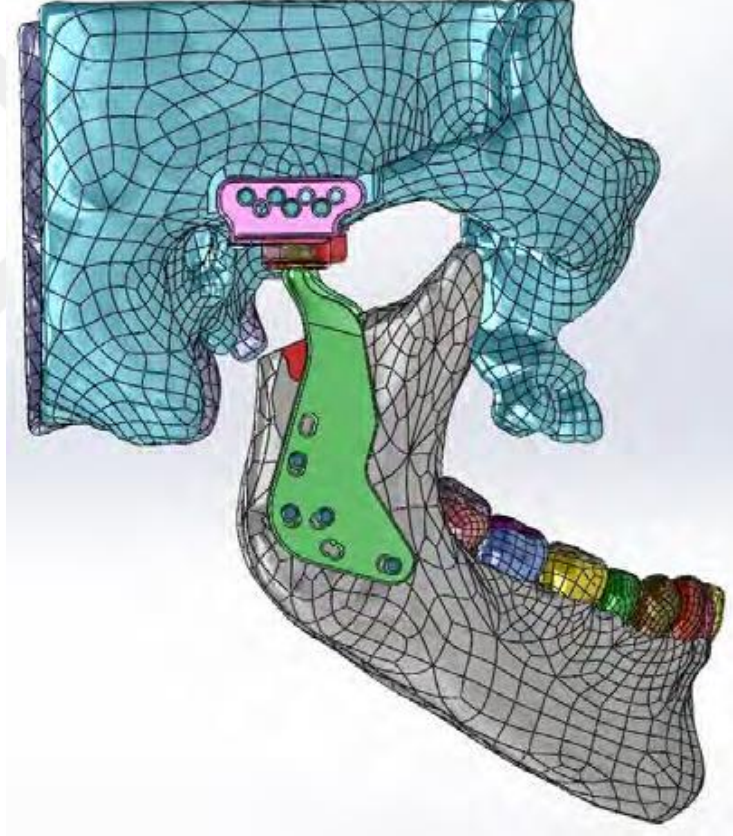
Glasgow'daki ünlü King's Theatre ve Birmingham yakınlarındaki Holly Lodge Lisesi'nin tüm ölçümleri, lazer tarama teknikleri kullanılarak nokta bulutları kullanılarak alınmıştır. Bu iki yapının tüm ölçümleri klasik fotoğrafçılıkla günler sürerken, yerden lazer tarama ile tüm ölçümler 3 günde tamamlanarak zamandan ve paradan tasarruf sağlanmıştır (Sabuncu ve Özener 2020).

2.7.5 Tıp

Günümüzde doktorların önündeki büyük sorunların arasında implantın hasarlı bölgeye doğru şekilde oturmaması, implantın ameliyat sonrası herhangi bir travmaya neden olması veya amaçlanan işlevi yerine getirmemesi durumlarıdır. Geleneksel üretim süreçlerinde üretilen implantlarda belirli bir standardı karşılayamamaktadır. Ameliyatlarda implantların bükülerek veya kesilerek revize olması gerekmektedir. Bu ameliyatlarda kalıntı gerilmelerine yol açabildiği gibi ameliyat süresini de uzatabilir. Bu gibi durumlardan kaçınmak için doktorlar hastanın anatomik yapısını görselleştirip kullanmaya başladılar. Müdahaleden önce ameliyat prosedürünün simülasyonu, ameliyattan önce özelleştirilmiş implantların veya kalıp plakaların imalatı gibi planlama yapmak için kolaylık sağlar (Modi ve Sanadhya 2018).

Yaralanma veya hastalık nedeniyle vücut veya organ işlev bozukluğu tüm dünyada birçok insanı rahatsız eden bir sağlık sorunudur. Bu nedenle bu hasarın onarımı veya protezlerin onarımı büyük talep yaratmakta ve yeni biyo malzemeler kullanılarak ortopedik ve cerrahi tekniklerin geliştirilmesi sağlanmaktadır (Saritaş 2015).

Temporomandibular eklem rahatsızlığına sahip hastalara takılan TME protezleri tersine mühendislik yöntemiyle geliştirilip hareket kolaylığı ve oluşan aşınmaları minimuma indirip hastanın kullanımında daha rahat etmesi sağlanmıştır. Hastalığın olduğu kemik katmanlarının Mimics programı aracılığıyla alınıp Solidworks programında işlenerek tersine mühendislik ile protez tekrar tasarlanmıştır (İmiroğlu vd. 2014).



Resim 2.19 Yeni tasarlanan TME protezinin eklem serbestliği (İmiroğlu vd. 2014).

Halk arasında kunduracı göğsü olarak da bilinen Pectus Excavatum tedavisinde tersine mühendislikle kullanılmak üzere kişiselleştirilmiş vakum tüpü tasarlamışlardır. Tüpler yarı otomatik olarak ve Hastanın göğüs yapısına deformasyonuna uyum sağlar şekilde tasarlanmıştır (Carfagni vd. 2018)

Doğuştan kalp kusurları olan ve kalp nakli listesine dâhil dört hasta üzerinde yapılan araştırma ve tersine mühendislik ile hastaların kalplerinin 3B görüntüleri oluşturulmuştur. Hızlı prototipleme sayesinde oluşturulan kalplerin nakli gerçekleştirilmiş (Schmauss vd. 2015).



Resim 2.20 3B Baskı ile oluşturulan model (Schmauss vd. 2015).

Radyal kafa kırığı ve arka dirsek çıkığı olan bir hasta için protez bulma durumunun problem olmasından dolayı hastaya özgü önkol protezi yapımına karar verilmiştir. Önkolün 3B görüntüsü alınarak bilgisayar ortamında işlendikten sonra protez başarılı bir şekilde üretilmiştir ve hastanın kolunun tekrardan kullanımı sağlanmıştır (Luenam vd. 2018).



Resim 2.21 3B Baskı ile yapılan titanyum protez (Luenam vd. 2018).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Aktarıcı Yöntemler ile 3B modelleme İşleminde Kullanılan Programlar

Bilgisayarlı tomografi görüntülerini yazdırmak üzere 3B yazıcıya göndermek için, seçilen Eriyik Yığma Modelleme (FDM) yazıcısının desteklediği ".stl" formatına dönüştürülmelidir. ".stl" formatına dönüştürmek için dijital ortamda 3D Mimics, 3D Doctor, 3D Slicer vb. kullanılmaktadır (Çelebi vd. 2017).

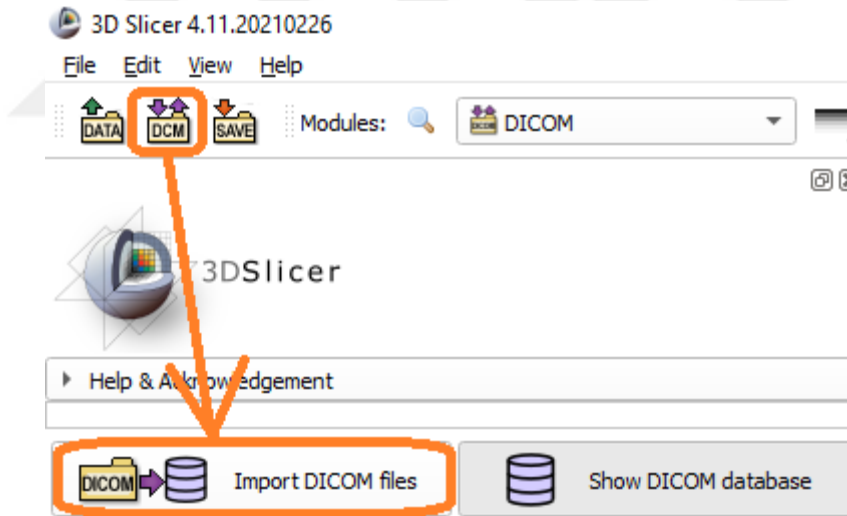
3.1.1 3D Slicer

3D Slicer (daha sonrasında Slicer olarak adlandırılmıştır), 1998'de Boston Brigham ve Kadın Hastanesi cerrahi plan laboratuvarı ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ndeki yapay zekâ laboratuvarında ortaklaşa başlatılan bir yüksek lisans tezi projesinden kaynaklanan, ücretsiz ve açık kaynaklı, son derece genişletilebilir, tıbbi görüntü işleme, işlenen görüntünün resmedilmesi ve uygulama platformunun analizinin görselleştirilmesine yardımcı olan bir uygulama olarak ortaya çıkmıştır. Amaç, kullanımı kolay bir analiz ve görselleştirme yazılımı geliştirmektir. David Gering, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü ve Boston'daki Brigham ve Kadın Hastanesi'nin cerrahi planlama laboratuvarındaki daha önceki araştırma ekiplerinin deneyimlerine dayanarak, Slicer prototipini ilk olarak 1999 yılında yüksek lisans tezinde önerdi. Daha sonra Steve Pieper, Slicer'ın baş mimarı olarak görev yaptı, Slicer'ı ticarileştirdi ve endüstriyel ölçekli kurulum paketlerinin gereksinimleri karşılamak üzere uygulamayı geliştirme çalışmaları yaptı. Slicer'ın geliştirilmesi 1999 yılından bu yana Ron Kikinis tarafından yönetilen cerrahi planlama laboratuvarının odak noktası olmuştur. Günümüzde Slicer'ı geliştirme çalışmalarının çoğu uygulama alanındaki profesyonel mühendisler, algoritma geliştiricileri ve bilim insanları tarafından yapılmaktadır. Bu arada, Isomics Şirketi, Kitware Şirketi, GE Küresel Araştırma Enstitüsü ve diğer şirketler de Slicer'ın geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Buna ek olarak, büyüyen Slicer kullanıcı topluluğu da uygulamanın gelişimine büyük katkıda bulunmaktadır. Slicer başlangıçta beyin cerrahisi kılavuzluğunda tedavi, görselleştirme ve analiz sistemi olarak tasarlanmıştır. Ama daha sonra, yaklaşık son 20 yıldır, tıbbi olmayan görüntü analizlerinin yanı sıra, hem klinik hem de klinik öncesi araştırma uygulamaları için kapsamlı bir uygulama

haline geldi (Zhang vd. 2019). Slicer'ın başlıca özelliği, diğer Slicer benzeri ticari ve açık kaynaklı yazılım araçları veya iş dallarının sahip olmadığı geniş bir işlevselliğe, iyi ölçeklenebilirliğe, platform bağımsızlığa ve sınırsız yazılım lisanslamasına sahip olmasıdır (Zhang vd. 2019). Bilgisayarlı tomografi ile elde ettiğimiz görüntüleri işlemek ve analizi kolaylaştırmak için programa yükleyip aşağıdaki işlem basamaklarını izlememiz gerekmektedir.

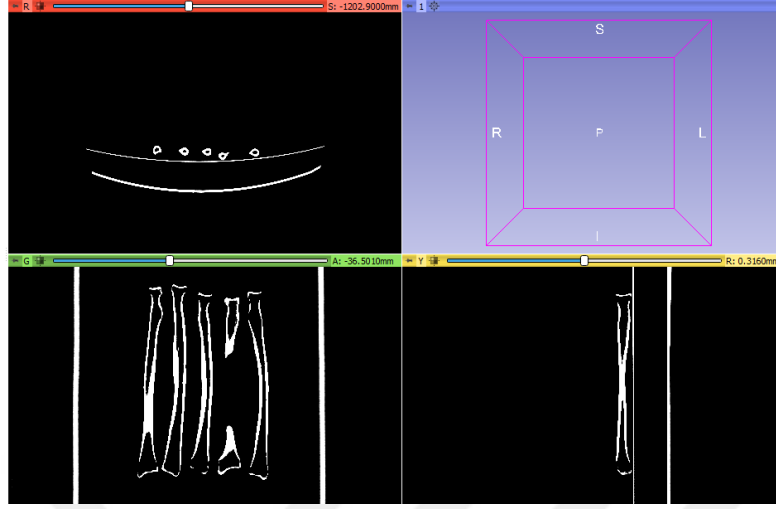
3.1.1.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma

DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), klinik ihtiyaçları karşılayan kalitede veri alışverişi için kullanılabilecek bir tıbbi görüntü formatıdır. BT görüntüsünün DICOM verileri genellikle seri biçimdedir ve insan vücudunun bir bölümünün kesit görüntülerinden oluşur. 3B Slicer'da DICOM dosyalarını içe aktarmak için klasördeki yazılımla birlikte gelen DICOM modülündeki “İçe Aktar” işlevini kullanıldı (Resim 3.1).



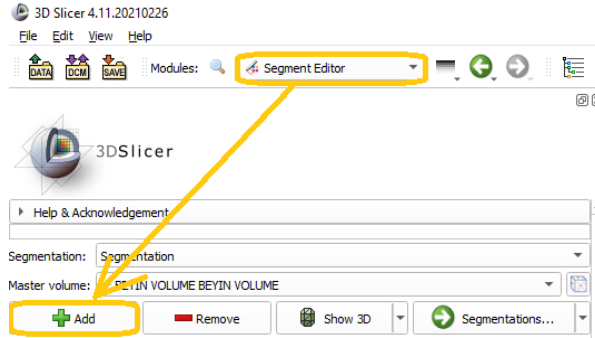
Resim 3.1 Slicer DICOM dosyası aktarımı.

3.1.1.2 Hacim Oluşturma

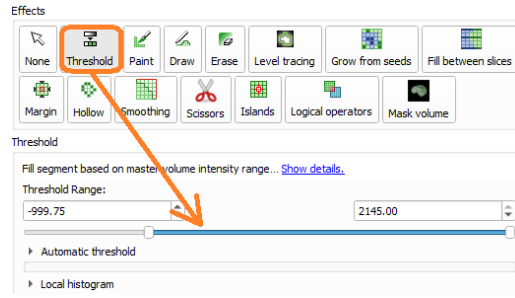


Resim 3.2 Slicer programına yüklenen görüntülerin görünüşleri.

Veriler i   aktarıldıktan sonra programda Radius kemiğinin   nden üstten ve sağından olmak üzere üç görüntüsü ekrana gelmektedir (Resim 3.2). Bu görüntüleri üç boyutlu görüntüye çevirmek için ilk olarak Threshold özelliğini kullanmamız gerekmektedir. Threshold düzenlenebilir yoğunluk aralığı anlamına gelmektedir.

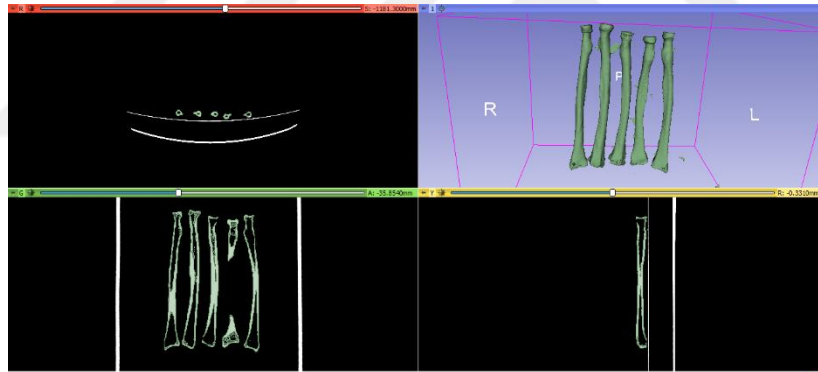


Resim 3.3 Slicer görüntü düzenleme adımı.

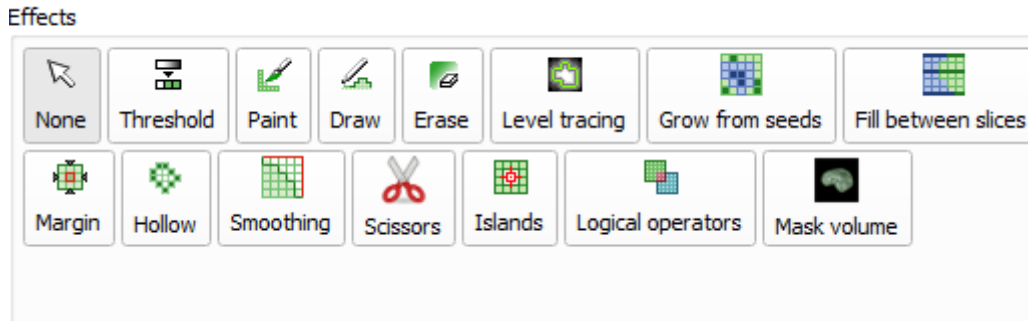


Resim 3.4 Slicer Threshold ayar ekranı.

Programa başarıyla aktarılan verilerin Threshold sekmesi aracılığıyla yoğunluk aralığı belirlenir. Bu özelliği kullanmak için sırasıyla “Segment Editor” ve sonrasında “Add” butonuna basarak altta açılan “Threshold” butonu ile açılan manuel ya da otomatik olarak farklı seçeneklerle yoğunluk aralığı düzenlenir (Resim 3.3) (Resim 3.4). Daha sonra “Show 3D” butonu ile Radius kemiklerimizin seçilen yoğunluk aralığında boyanmış üç boyutlu halleri oluşturuldu (Resim 3.5).



Resim 3.5 Slicer 3B oluşan görüntü.



Resim 3.6 Slicer programında yer alan düzenleme butonları.

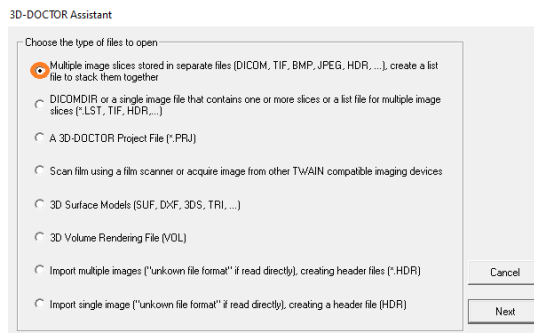
Oluşan 3B görüntüler hata veya istenmeyen durumlar içermekte ise program bize bunları manuel olarak düzeltme imkânı vermekte. Sorunları gidermek için “Segment Editor” butonunun altında yer alan “Effects” sekmesinde bulunan “Paint” “Draw” “Erase” gibi komutlarla programa yüklenen her görüntü diliminde işlem yaparak daha doğru sonuçlar elde edilmektedir (Resim 3.6).

3.1.2 3D Doctor

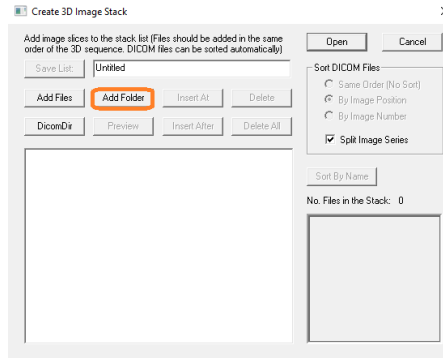
3D DOCTOR Programı, 3B model oluşturmak için görüntü dosyalarından bilgi alır. Nesne yönelimli teknoloji kullanılarak geliştirilmiştir ve kullanımı kolay bir ortamda 3B görüntüleri, nesne sınırlarını, 3B modelleri ve diğer ilgili veri öğelerini işlemek ve analiz etmek için etkili araçlar sağlamaktadır. 3B görüntü segmentasyonu, 3B yüzey modelleme, işleme, hacim oluşturma, 3B görüntü işleme, ayırma, kayıt, otomatik hizalama, ölçümler ve diğer birçok işlev bu program yardımıyla gerçekleştirilebilir. 3D DOCTOR; DICOM, TIFF, Interfile, GIF, JPEG, PNG, BMP, PGM, RAW veya diğer görüntü dosyası biçimleriyle depolanan hem gri tonlamalı hem de renkli görüntüleri destekler. 3D DOCTOR, bilgisayar da eş zamanlı olarak 2B kesit görüntülerinden 3B yüzey modelleri ve hacim oluşturmaya olanak sağlar (Mathukumar vd. 2019).

Bilgisayarlı tomografi ile elde edilen insan Radius kemiklerinin görüntüleri programa yüklenerek işlemlere başlanır. Aşağıdaki basamaklar izlenerek 3B model oluşturulacaktır.

3.1.2.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma



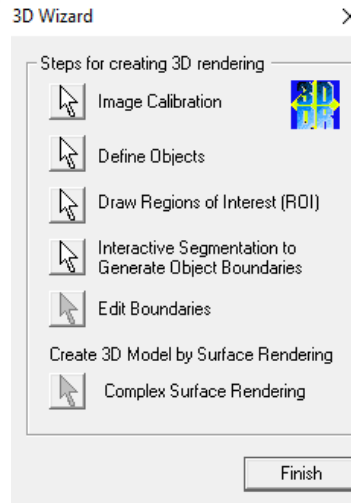
Resim 3.7 3D Doctor DICOM dosya aktarımı adım 1.



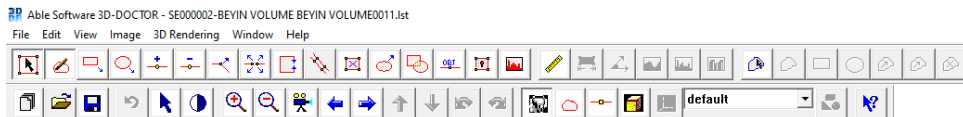
Resim 3.8 3D Doctor Dicom dosya aktarımı adım 2.

Program açıldığında öncelikle istenilen yüklenecek olan dosyanın türünün belirlenmesidir (Resim 3.7). Daha önceden bahsettiğimiz “DICOM” formatını seçip devam edildi. Daha sonra açılan ekrandan “Add Folder” butonundan görüntülerin olduğu dosyayı açarak görüntüleri programa yüklendi (Resim 3.8).

3.1.2.2 Hacim Oluşturma

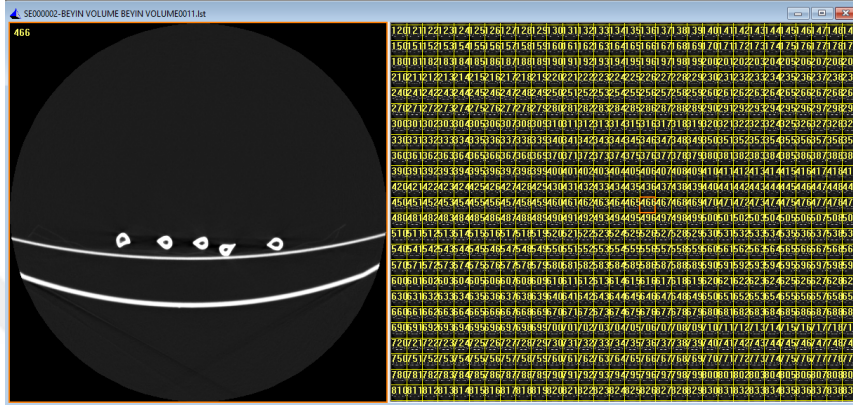


Resim 3.9 3D Doctor 3B hacim oluşturma basamakları.



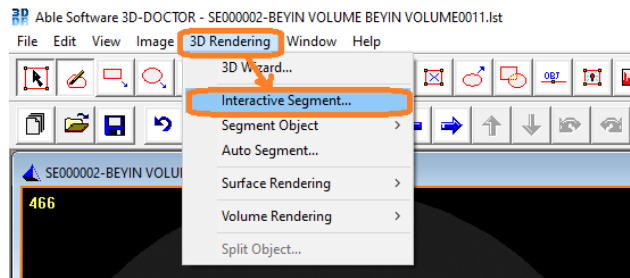
Resim 3.10 3D Doctor programı içerisinde yer alan düzenleme butonları.

Görüntüler yüklenip ekran açıldığında Resim 3.9’da yer alan “3D Wizard” ekranı açıldı. Bu ekranın amacı programda amacımız olan üç boyutlu görüntü için işlem basamaklarını gösteren program içi yol haritasını bize göstermektir. Başka bir yol izlenmek istenirse, daha uzun sürecek işlemler için program içindeki Resim 3.10’da gösterilen butonlarla işlemlere devam edilebilir.

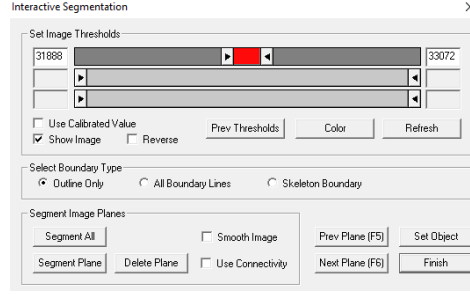


Resim 3.11 3D Doctor işlem ekranı.

Resim 3.11’de sol tarafı insan Radius kemiklerinin üstten görünüşünü verirken sağ tarafı ise insan Radius kemiklerinin her bir katmanını göstermektedir. İnsan Radius kemiklerinin 3B hallerini oluşturmak için ilk olarak imleci kemik görüntüsünün üzerine getirerek üstteki butonları aktifleştirmeliyiz. Daha sonra yoğunluk aralığını düzenlemek için “3D Rendering” kısmından “Interactive segment” bölümünü açarak manuel olarak yoğunluk ayarı yapılmalıdır (Resim 3.12) (Resim 3.13).

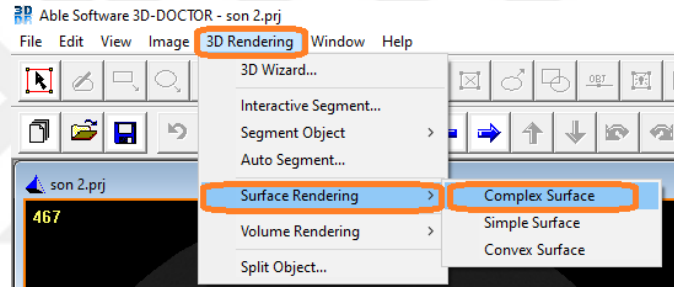


Resim 3.12 3D Doctor 3B oluşturma işlem adımı.

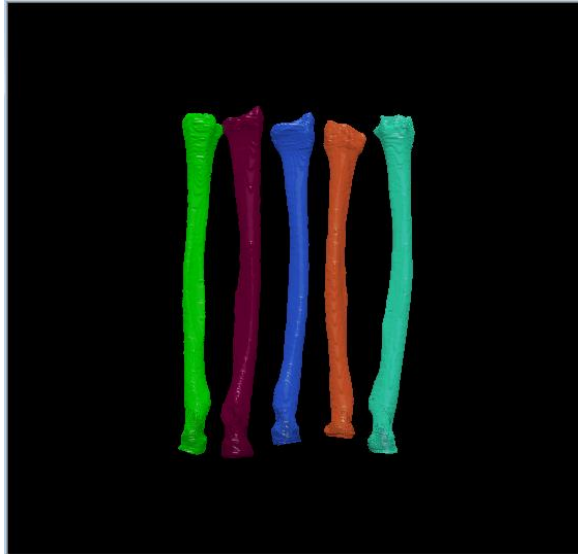


Resim 3.13 3D Doctor Treshold ayar ekranı.

Yoğunluk değeri belirlendikten sonra tekrar “3D Rendering” kısmından “Surface Rendering” ve “Complex Surface” 3B modellenmiş olunur (Resim3.14) (Resim 3.15). Ancak oluşan modelde eksik veya istenmeyen yerler olabilir bu sebep ile her katmanın teker teker kontrol edilip işlemler yapılmalıdır.



Resim 3.14 3D Doctor 3B görüntü açma adımı.

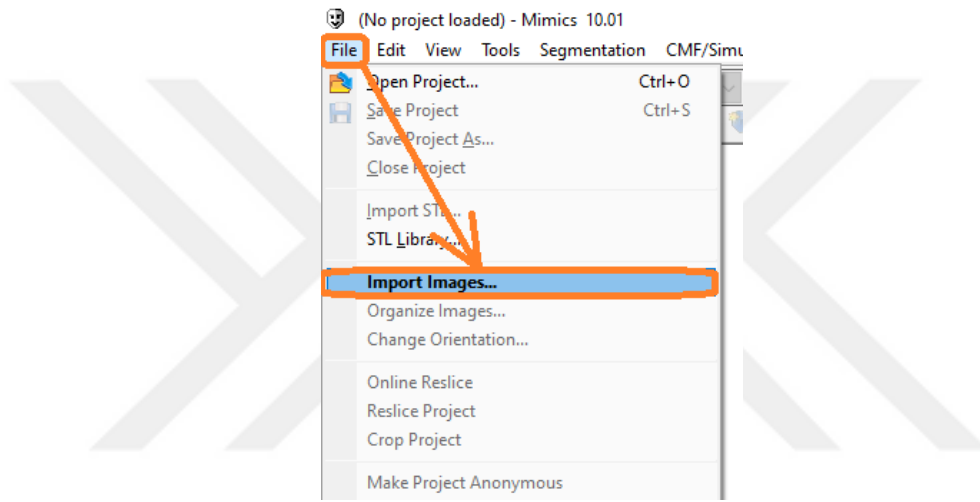


Resim 3.15 3D Doctor 3B görüntü.

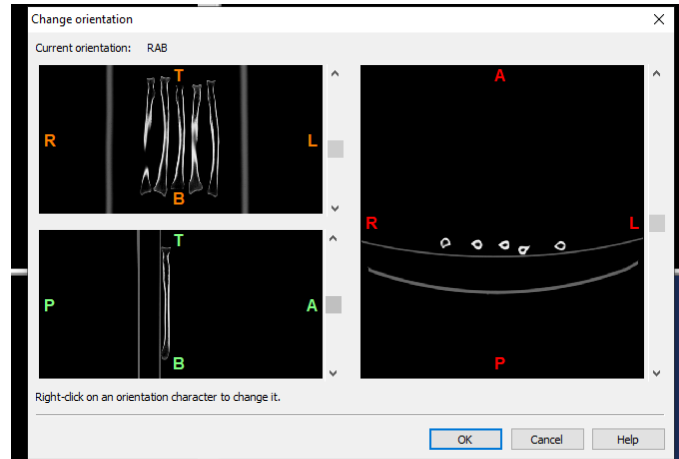
3.1.3 3D Mimics

MIMICS, 3B yüzey modelleri, 3B tasarım, 3B ölçümleri oluşturmak için kullanılan bir görüntü işleme yazılımıdır (Patil vd. 2018). İnsan Radius kemiklerinin görüntüleri programa yüklenerek işlemlere başlanır. Aşağıdaki basamaklar izlenerek 3B model oluşturulacaktır.

3.1.3.1 Dicom Dosyalarını İçeri Aktarma

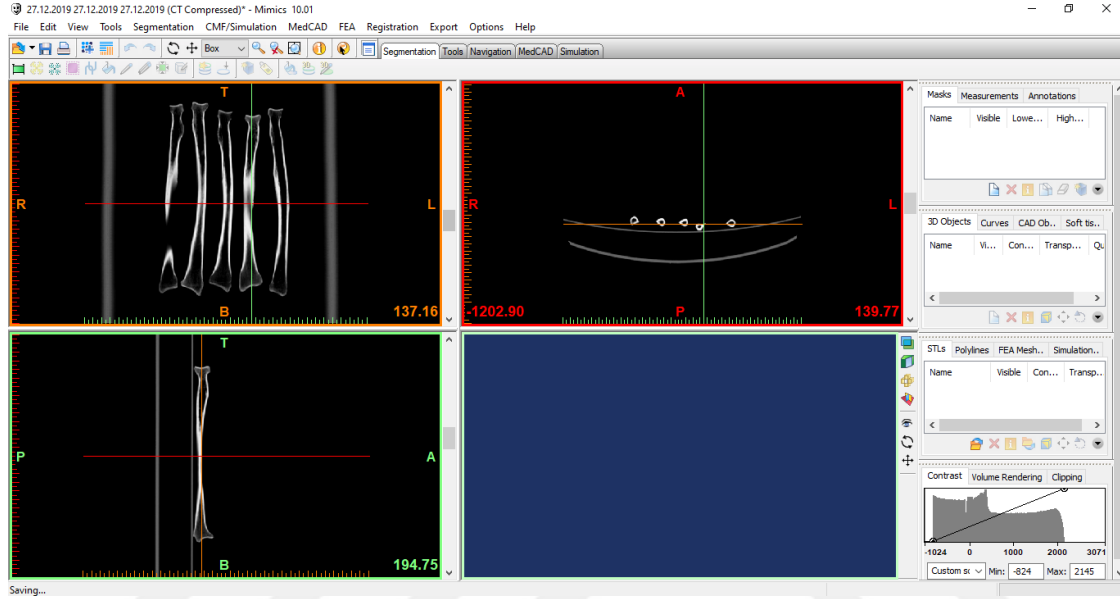


Resim 3.16 Mimics DICOM dosya aktarımı.



Resim 3.17 Mimics yüklenen DICOM görüntülerinin yönlerini belirleme.

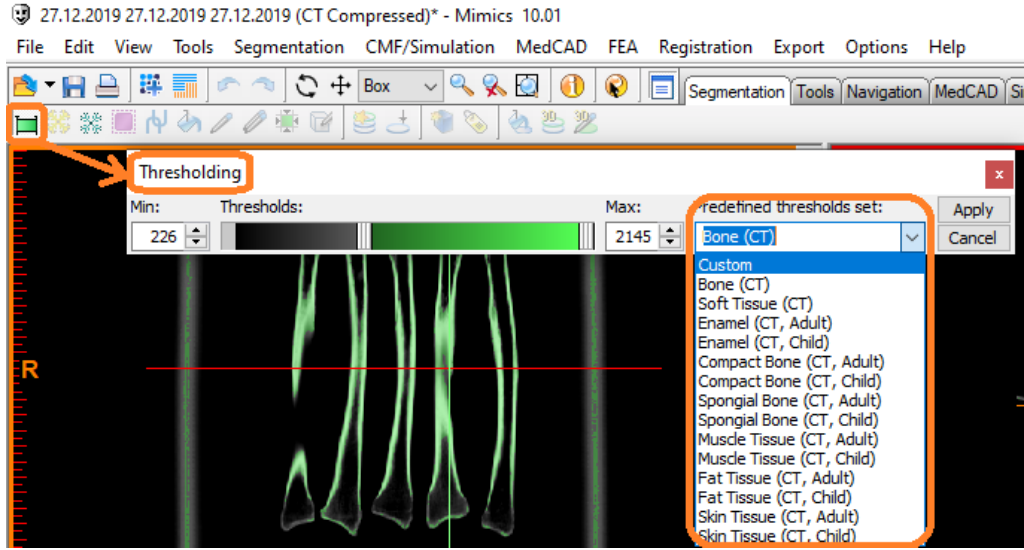
Program açıldıktan sonra “File” “Import Images” butonları ile açılan pencerede bilgisayarımızda bulunan DICOM dosyalarını seçip onayladıktan sonra program bizden görüntülerin açılış penceresindeki konumunu belirlememizi istemektedir (Resim 3.16) (Resim 3.17). Konumları belirttikten sonra açılış ekranında iki boyutlu görüntüler üstten, önden ve yandan olmak üzere üç pencerede açılmaktadır (Resim 3.18).



Resim 3.18 Mimics programına yüklenen görüntülerin görünüşleri.

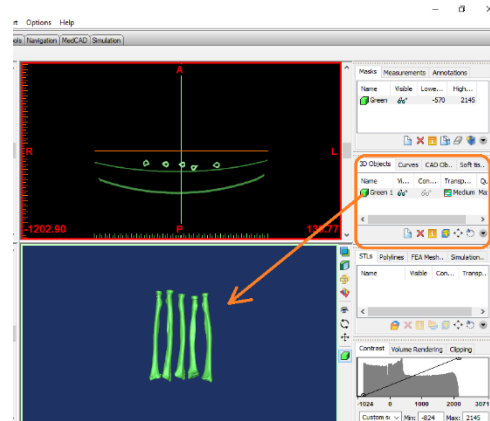
3.1.3.2 Hacim Oluşturma

Yoğunluk değerini belirlemek için program içerisinde bulunan “Thresholding” butonu ile açılan pencerede manuel olarak değeri ayarlayabilir (Resim 3.19). Açılan pencerede bize yardımcı olmak için yoğunluk ayarlaması yapılacak olan görüntünün kemik olup olmadığını veya yetişkin mi çocuk mu olduğunu sorarak bize yardımcı olmaktadır.



Resim 3.19 Mimics Treshold ayar ekranı.

Yoğunluk değerini belirledikten sonra program penceresinin sağ tarafında yer alan ilk kutucukta “Masks” sekmesi altında “Green” olarak belirlenen ilk yoğunluk değeri yer almaktadır. Pencerenin altında yer alan simgelerle bu kutucuktaki yoğunluk değerleri silinebilir, yenisi eklenebilir, hacim ve boyut olarak bilgi verir. Resim 3.20’de işaretli simgeye basıldığında yoğunluk ayarlaması yapılan görüntünün dördüncü pencerede 3B görüntüsü oluşmaktadır.



Resim 3.20 Mimics 3B oluşan görüntü.

3.1.4 Endüstriyel Tip 3B Tarayıcı (KScan-Magic)

SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD, akıllı görsel denetim ekipmanlarının geliştirilmesi, üretimi ve satışı konusunda uzmanlaşmış yüksek teknoloji kuruluşudur.

Profesyonel 3D dijital ekipman tedarikçilerinden biri olan ScanTech'e çok sayıda teknolojik patent verilmiş ve atanmıştır. Ar-Ge ekibi, kompozit 3D tarayıcı, el tipi 3D lazer tarayıcı, küresel 3D tarayıcı gibi kendine ait fikri mülkiyetlere sahip bir dizi 3D dijital ekipman geliştirmiştir. Bunlardan biri de “KSCAN-MAGİC KOMPOZİT 3D TARAYICI” dır (Resim 3.21) (İnt. Kyn. 10).

“KSCAN-MAGİC KOMPOZİT 3D TARAYICI” uygulama aralığı daha da geniş olan ve diğer endüstriyel tarayıcılardan ayıran özelliği akıllı kenar algılama, temaslı problama ve boru ölçümü yapmasıdır. Çok sayıda farklı tarama modu, ultra hızlı, aşırı ince, geniş alan ve derin delik tarama modları ve dahili bir fotogrametri sistemi sayesinde, bu endüstriyel sınıf tarayıcı, her türlü tarama için kullanılabilen bir cihazdır. Ayrıca kendine özgü bir yazılımla tarama sonuçlarını üç boyutlu hale getirmektedir (İnt. Kyn. 11).



Resim 3.21 Endüstriyel tip tarayıcı (KScan-Magic) (İnt. Kyn. 12).

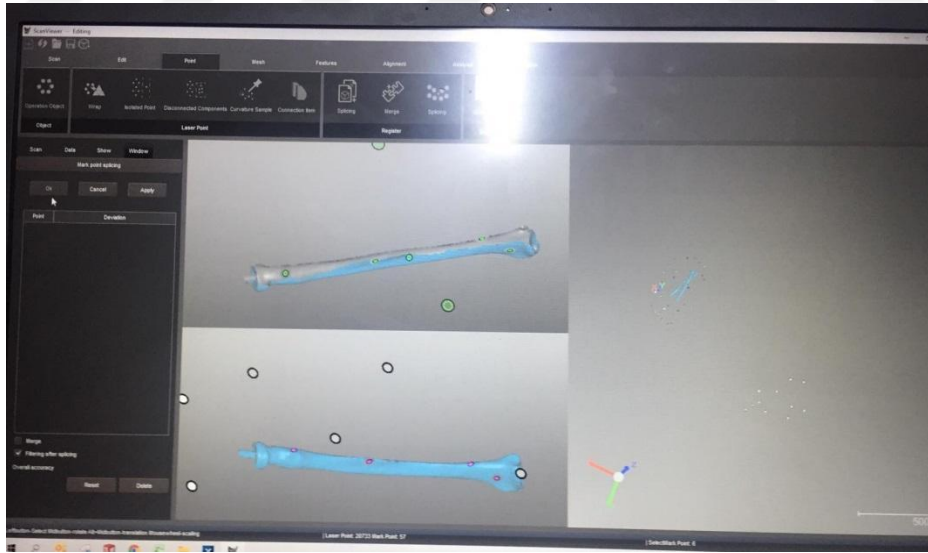
3.1.4.1 Çalışma Prensibi

1. Tarayıcıdaki iki kamera seti sırasıyla nesneden projeksiyon lazerini alır. Tarayıcı nesne yüzeyinde hareket ederken lazer deforme olacaktır, daha sonrasında, ilk olarak doğru bir şekilde iki kamera arasındaki mesafe kalibre edilirken, lazerden gelen 3B bilgisini hesaplayabiliriz.



Resim 3.22 Endüstriyel tip tarayıcı ile görsel işaretli insan Radius kemiğinin taranması.

2. Tarayıcı, uzamsal konum dönüşümü yaparken kullanılan taramayı yaparken, nesne üzerindeki görsel işaretlere göre uzamsal konumu tanımlar (Resim 3.22).
3. Tarayıcı hareket ettiğinde, lazerin geçtiği 3B konum bilgisi, 3B doğrusal bilgidен ve görelî uzamsal konumdan faydalanarak elde edilir. Böylece devamlı 3B bilgisi oluşturur (Resim 3.23) (İnt. Kyn. 10).



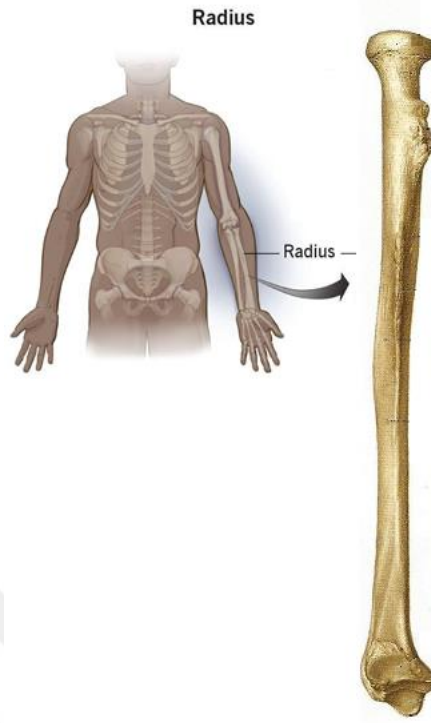
Resim 3.23 Endüstriyel tip tarayıcının kendine ait program ile 3B modellemesi.

3.1.4.2 Kullanım Alanları

Endüstriyel alanda çokça kullanılan bu tarama ve modelleme şeklinin başlıca kullanıldığı alanları; Havacılık endüstrisi, Otomotiv endüstrisi, Endüstriyel üretim, Tersine mühendislik, Kalite kontrol, 3B modelleme, Enjeksiyon kalıplarının üretimi, Sağlık ve diş hekimliği, Kültürel mirasın korunması, Eğitim, Bilim, Tasarım, AR/VR olarak belirlenmiştir (İnt. Kyn. 11).

3.2 Radius Kemiğinin Anatomisi

Radius, ön koldaki iki uzun kemikten daha kalın ve daha kısa olanıdır. Ön kolun yan tarafında başparmak ile dirsek arasında Ulna'ya paralel (anatomik pozisyonda, kollar vücudun yanlarında asılı, avuç içi öne bakacak şekilde) yer alır (Resim 3.24). Bileğin dönmesine izin vermek için Radius ve Ulna birbirinin etrafında döner. Radius genellikle ön kolun iki uzun kemiğinden daha büyük olan olarak görülür çünkü bilekte Ulna'dan daha kalın ve dirsekte daha incedir. Ulna çoğu insanın Radius kemiğinden yaklaşık bir inç daha uzundur, ancak uzunlukları önemli ölçüde değişir (Paulsen ve Waschke 2011).



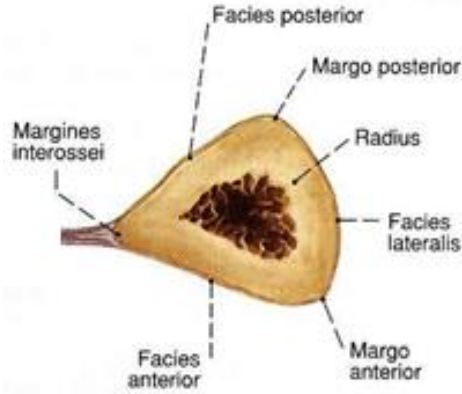
Resim 3.24 Radius kemiğinin vücuttaki yeri Radius kemiğinin vücuttaki yeri.

Proksimal ve distal adı ile adlandırılan iki farklı ucu vardır. Radius proksimal ucuyla dirsek eklemi, distal ucuyla el bileği eklemine bağlanır. Radius distal kısmı epifiz ve metafiz bölgelerini içeren dörtgen şeklinde bir kesite sahiptir. Distal radius anatomik olarak stiloid çıkıntı, Lister tüberkülü ve dört yüzey (volar, lateral, dorsal ve medial) içermektedir (Misir 2016).



Resim 3.25 İnsan Radius kemiğinin bölümleri (Paulsen ve Waschke 2011).

Proksimal uç hem distal humerus hem de proksimal ulna ile eklem yapan kısmı içerirken distal uç bilekte ulna ve karpal kemikleri ile eklem yapar. Şaft (gövde) interosseous border adı verilen yoğun bağ dokusu ile ulna kemiğine sıkı bir şekilde bağlıdır (İnt. Kyn. 13). Ön yüzeyi içbükeydir ve öne doğru eğimlidir, pronator quadratus ile örtülüdür. Pürüzlü yüzeyi, palmar-radyal karpal bağ için bir bağlantı noktası sağlar. Ön yüzey radyal stiloidden ulnar üçgen fibrokartilaj kompleksine kadar gelir. Kapitat (radyokapitat), lunat (radyolunat) ve triquetrum (radyotriquetral) için distal ve ulnar olarak uzanır (Obert vd. 2015). Radiusun gövde kısmı Corpus radii olarak isimlendirilen üçgen şeklindedir (Resim 3.25). Gövde kısmı facies anterior, facies posterior ve facies lateralis olmak üzere üç yüzü; margo anterior, margo posterior ve margo interosseus olmak üzere üç kenarı bulunmaktadır (Resim 3.26).

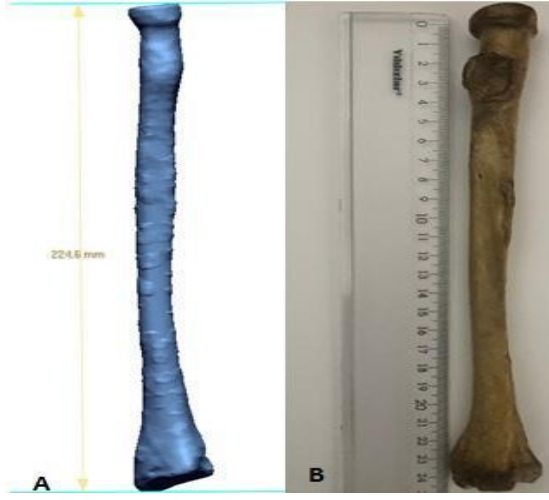


Resim 3.26 İnsan Radius kemiğinin enine bölümleri (Paulsen ve Waschke 2011).

3.3 Radius Kemiklerinin Morfometrik Ölçümleri

Çizelge 3.1’de Radius kemiğine ait altı bölümün uzunlukları dijital kumpas yardımıyla elde edilmiştir. Bir Operatör yardımıyla kumpas kemikler üzerinde ayarlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Radius kemiklerine ait morfometrik ölçümleri (Sarıtaş 2022).



Radius kemiğin
proksimal ve distal
uçları arasındaki dik
mesafesinin
ölçümü.
(L₁)

A: Radius kemik uzunluğunun ölçüsü.

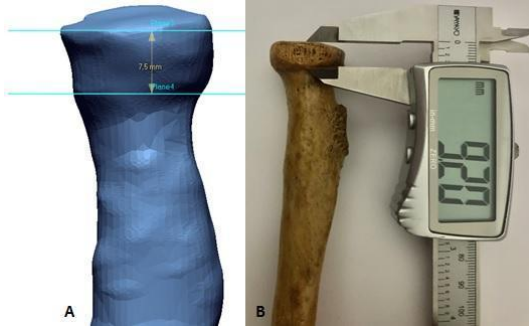
B: Radius kemiğin cetvel ile ölçümü.



Proksimal distal
üzerindeki
lateromedial çapının
ölçümü.
(D)

A: Proksimal distal üzerindeki
lateromedial çapının ölçüsü.

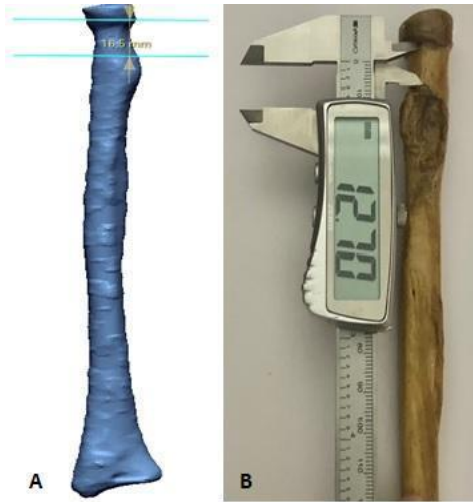
B: Ölçünün Dijital kumpas ile ölçümü.



Lateral tarafta
proksimal
Radius'un kalınlığı.
(L₂)

A: Lateral tarafta caput radii'nin yüksekliği.

B: Kalınlığın dijital kumpas ile ölçümü.



Proksimal Radius
ve Tuberositas radii
arasındaki dik
mesafe.
(L₃)

A: Proksimal Radius ve Tuberositas radii arasındaki dik mesafe.

B: Mesafenin dijital kumpas ile ölçümü.



Radius'un
extremitas
distalis'inde yer
alan incisura
ulnaris'in en geniş
yerinden ölçümü.
(L₄)

A: Incisura ulnaris genişliği.

B: Genişliğin dijital kumpas ile ölçümü.



A: Tuberculum dorsale hizasında radius genişliğinin ölçümü.

B: Genişliğin dijital kumpas ile ölçümü.

Ölçüm değerlerinin birimi mm olarak seçilmiştir.

Radius'un
extremitas
distalis'inde
tuberculum dorsale
hizasında extremitas
distalis genişliğinin
ölçümü.
(L5)

4. BULGULAR

Çalışmada kullanılan 3B Radius modeller üç adet medikal program (Mimics, 3D Slicer ve 3D Doctor) ve 3B Tarayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 3B Radius modellerinin hacim değerleri, gerçek Radius kemiğinin Arşimed prensibi ile elde edilen hacim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Kemiklerin sadece hacim ölçüleri ile karşılaştırılması literatürde gerçek bir karşılaştırma olarak görülmemektedir (Gupta vd. 2015; Mahaisavariya vd. 2004; Rayna vd. 2018). Çünkü her kemik belirli özelliklere, geometrik formlara ve özel bölgelere sahiptir. Her kemiğin belirli bölgelerindeki formlar ve geometrik ölçüler farklılık göstermektedir. Bu yüzden biz çalışmamızda kemiklerin hacim ölçülerinin yanında (Çizelge 4.1) Radius kemiğine ait morfolojik ölçümleri de gerçekleştirdik. Bu ölçüm değerleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

4.1 Hacim Ölçümleri

Kontrol grubundaki Radius kemiklerinin hacim ölçümleri 3B Tarayıcı yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Kontrol grubu ve diğer program ve yöntemler ile hacim ölçümlerinin sayısal değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Radius kemiklerinin yöntem ve programlara göre hacim ölçümleri.

<i>Hacim Ölçümü</i>					
<i>Yöntemi ve Programları</i>	<i>Radius 1</i>	<i>Radius 2</i>	<i>Radius 3</i>	<i>Radius 4</i>	<i>Radius 5</i>
Mimics	29599.9	32880.5	30568.32	26355.25	30859.36
3D Slicer	36045.7	31238.8	36118.5	39335.1	35176.75
3D Doctor	35062.4	36638.2	30916.5	26521.8	33109.2
3D Tarayıcı	30258.3	31256.4	28921.3	24775.6	29468.9

4.2 Radius Kemiklerinin Morfometrik Ölçümleri

Radius kemiğine ait morfometrik ölçümler aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Ölçümler Geomagic Design X yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Mimics, 3D Doctor, 3D Slicer ve

3B Tarayıcıdan elde edilen mesh formundaki (.stl) dosyalar Geomagic Design X programına aktarılarak kemiğin önceden belirlenmiş parametrelerinin mesafeleri operatör yardımıyla ölçülmüştür. Çizelge 4.2’de Radius kemiğin Mimics programında ölçülmüş parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.2 Radius kemiklerinin Mimics programındaki morfometrik ölçümleri.

<i>Parametreler</i>	<i>Radius 1</i>	<i>Radius 2</i>	<i>Radius 3</i>	<i>Radius 4</i>	<i>Radius 5</i>	<i>Ort.</i>
L₁	224.06	229.25	216.3	207.58	224.55	220.34
D	15.5	16.5	16.58	16.76	17.44	16.55
L₂	10.42	10.2	10.17	9.31	11.45	10.31
L₃	14.65	11.76	12.87	13.38	14.47	13.42
L₄	14.74	12.45	13.68	13.64	13.07	13.51
L₅	29.11	27.17	28.06	24.47	24.98	26.76

Ölçü birimi mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.2’de beş adet kemiğe ait L1 parametre değerlerinin ortalaması 220.34 mm olarak bulunmuştur. L1 parametresinin en küçük değeri Radius 4 kemiği üzerinde görülmüştür. Diğer parametrelerin (D, L₂, L₃, L₄ ve L₅) ortalama değerleri sırasıyla 16.55 mm, 10.31 mm, 13.42 mm, 13.51 mm ve 26.76 mm olarak elde edilmiştir. 3D Doctor programında elde edilen ölçüm değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Radius kemiklerinin 3D Doctor programındaki morfometrik ölçümleri.

<i>Parametreler</i>	<i>Radius 1</i>	<i>Radius 2</i>	<i>Radius 3</i>	<i>Radius 4</i>	<i>Radius 5</i>	<i>Ort.</i>
L₁	224.78	227.59	215.01	206.09	222.99	219.29
D	16.56	16.91	17.5	16.78	15.28	16.6
L₂	10.91	9.59	10.54	8.02	10.24	9.86
L₃	16.96	15.51	12.25	13.31	15.12	14.63
L₄	12.72	11.92	10.96	11.09	12.22	11.78
L₅	29.71	27.53	29.48	28.48	28.07	28.65

Ölçü birimi mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.3’de beş adet kemiğe ait L1 parametre değerlerinin ortalaması 219.29 mm olarak bulunmuştur. L1 parametresinin en küçük değeri Radius 4 kemiği üzerinde

görülmüştür. Diğer parametrelerin (D, L₂, L₃, L₄ ve L₅) ortalama değerleri sırasıyla 16.6 mm, 9.86 mm, 14.63 mm, 11.78 mm ve 28.65 mm olarak elde edilmiştir. 3D Slicer programında elde edilen ölçüm değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Radius kemiklerinin 3D Slicer programındaki morfometrik ölçümleri.

<i>Parametreler</i>	<i>Radius 1</i>	<i>Radius 2</i>	<i>Radius 3</i>	<i>Radius 4</i>	<i>Radius 5</i>	<i>Ort.</i>
L₁	222.95	207.62	215.47	229.01	224.69	219.95
D	16.36	16.92	16.36	18.62	15.48	16.75
L₂	10.24	9.65	11.78	11.38	11.84	10.98
L₃	15.73	12.83	11.94	11.84	15.87	13.64
L₄	12.52	11.47	11.68	11.84	12.14	11.93
L₅	27.78	28.32	29.64	28.54	28.41	28.54

Ölçü birimi mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.4’de beş adet kemiğe ait L1 parametre değerlerinin ortalaması 219.95 mm olarak bulunmuştur. L1 parametresinin en küçük değeri Radius 2 kemiği üzerinde görülmüştür. Diğer parametrelerin (D, L₂, L₃, L₄ ve L₅) ortalama değerleri sırasıyla 16.75 mm, 10.98 mm, 13.64 mm, 11.93 mm ve 28.54 mm olarak elde edilmiştir. 3B Tarayıcı yönteminde elde edilen ölçüm değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Radius kemiklerinin 3B Tarayıcı yöntemiyle morfometrik ölçümleri.

<i>Parametreler</i>	<i>Radius 1</i>	<i>Radius 2</i>	<i>Radius 3</i>	<i>Radius 4</i>	<i>Radius 5</i>	<i>Ort.</i>
L₁	224.46	226.58	215.13	206.57	223.01	219.15
D	16.22	15.86	16.34	15.98	16.76	16.76
L₂	10.61	9.23	10.17	8.98	9.12	9.12
L₃	15.28	14.85	11.05	11.85	13.07	13.07
L₄	13.72	12.58	10.78	11.03	11.95	11.95
L₅	29.48	28.12	30.14	27.84	24.36	24.36

Ölçü birimi mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.5’de beş adet kemiğe ait L1 parametre değerlerinin ortalaması 219.15 mm olarak bulunmuştur. L1 parametresinin en küçük değeri Radius 4 kemiği üzerinde görülmüştür. Diğer parametrelerin (D, L₂, L₃, L₄ ve L₅) ortalama değerleri sırasıyla 16.76

mm, 9.12 mm, 13.07 mm, 11.95 mm ve 24.36 mm olarak elde edilmiştir.

4.3 Morfometrik Ölçümlerin İstatistiksel Değerlendirmesi

Dört farklı yönteme göre üretilen Radius kemiklerine ait 3B modellerin ölçümleri Geomagic Design X programında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen veriler kendi grupları içerisinde ve diğer gruplar karşısında belirli sayısal anlamlar taşımaktadır. Bu anlamların neler olduğu istatistik çalışması ile ortaya çıkarılmıştır. İstatistik çalışması SPSS (IBM-International Business Machines-Uluslararası İş Makineleri) programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Radius parametrelerinin ölçümlerinden elde edilen verilerle her grubun ölçüm skalası oluşturulmuştur. Bu ölçümler bir önceki başlık altında (Çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5) gösterilmiştir. Her bir yöntemin ölçüm değerlerinin sayısı, ortalaması ve standart sapması Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Radius kemiğine ait parametrelerin istatistiksel incelenmesi.

Yöntem		L1	L2	L3	L4	L5	D
Mimics	Ort.	220.3480	10.3100	13.4260	13.5160	26.7580	16.5560
	N	5	5	5	5	5	5
	Std. Sapma	8.51601	0.76541	1.19110	0.84790	1.98703	0.69676
3D Doctor	Ort.	219.2920	9.8600	14.6300	11.7820	28.6540	16.6060
	N	5	5	5	5	5	5
	Std. Sapma	8.73611	1.13664	1.86079	0.74921	0.92630	0.81889
3D Slicer	Ort.	219.9480	10.9780	13.6420	11.9300	28.5380	16.7480
	N	5	5	5	5	5	5
	Std. Sapma	8.45060	0.98185	2.00793	0.41061	0.68060	1.16650
3B Tarayıcı	Ort.	219.1500	9.6220	13.2200	12.0120	27.9880	16.2320
	N	5	5	5	5	5	5
	Std. Sapma	8.25708	0.72358	1.83772	1.19644	2.23936	0.35088
Total	Ort.	219.6845	10.1925	13.7295	12.3100	27.9845	16.5355
	N	20	20	20	20	20	20
	Std. Sapma	7.80851	0.99461	1.70158	1.06012	1.66119	0.77027

Çizelge 4.6’da verilen ön istatistik değerler, yöntemlere ait sayıların ve standart

sapmalarının birbirleri arasındaki farklarının ne kadar olduğunu göstermektedir. İstatistik için bir ön bilgi niteliğindedir. İstatistik çalışmasında dört farklı grup birbirleri ile karşılaştırıldığı ve bu gruplar bağımsız değişken oldukları için Kruskal Wallis testi gerçekleştirilmiştir. Bu istatistik test ile grupların birbirleri arasındaki anlamlılık ilişkileri karşılaştırılmıştır. Kruskal Wallis testinde öncelikle Hipotez testi gerçekleştirilir. Yani bir anlamda her bir parametrenin anlamlılık değerleri incelendi (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 Hipotez Test Özeti.

	Geçersiz Hipotez	Test	Sig. ^{a,b}	Açıklama
1	D'nin dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.506	Geçersiz Hipotez korunacak.
2	L1'in dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.972	Geçersiz Hipotez korunacak.
3	L2'nin dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.160	Geçersiz Hipotez korunacak.
4	L3'ün dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.566	Geçersiz Hipotez korunacak.
5	L4'ün dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.066	Geçersiz Hipotez korunacak.
6	L5'in dağılımı, Yöntem kategorileri içerisinde benzerdir.	Kruskal-Wallis Test	0.332	Geçersiz Hipotez korunacak.

a. Anlamlılık seviyesi 0.05

b. Asimptotik anlamlılık görüntülenir

Çizelge 4.7'e göre dört farklı yonteme ait altı farklı parametrenin incelendiği ve bu parametrelerin gruplar içerisinde herhangi bir anlamlılık değerinin ($p < 0.05$) olmadığı görülmektedir. Anlamlılık değerinin oluşmasına en yakın parametrenin olarak görülen L4 parametresine ($(p = 0.066) > 0.05$) aittir. Bu çalışmada Kruskal Wallis testi ile ikiden fazla yöntemin (Toplamda dört adet) kendi aralarında anlamlı olup olmadığı ölçülmüştür. Fakat iki bağımsız değişkenli yöntemin birbiri ile karşılaştırılması Mann Whitney U testi ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki çizelgelerde yöntemler arasındaki test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.8 Mann-Whitney Test.

	Yöntem	N	Mean Rank	Sum of Ranks
<i>L1</i>	Mimics	5	6.00	30.00
	3B Tarayıcı	5	5.00	25.00
	Total	10		
<i>L2</i>	Mimics	5	6.90	34.50
	3B Tarayıcı	5	4.10	20.50
	Total	10		
<i>L3</i>	Mimics	5	5.40	27.00
	3B Tarayıcı	5	5.60	28.00
	Total	10		
<i>L4</i>	Mimics	5	7.00	35.00
	3B Tarayıcı	5	4.00	20.00
	Total	10		
<i>L5</i>	Mimics	5	4.60	23.00
	3B Tarayıcı	5	6.40	32.00
	Total	10		
<i>D</i>	Mimics	5	6.50	32.50
	3B Tarayıcı	5	4.50	22.50
	Total	10		

Çizelge 4.9 Test İstatistikleri.

	L1	L2	L3	L4	L5	D
<i>Mann-Whitney U</i>	10.000	5.500	12.000	5.000	8.000	7.500
<i>Wilcoxon W</i>	25.000	20.500	27.000	20.000	23.000	22.500
<i>Z</i>	-0.522	-1.467	-0.104	-1.567	-0.940	-1.048
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>	0.602	0.142	0.917	0.117	0.347	0.295
<i>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</i>	.690 ^b	.151 ^b	1.000 ^b	.151 ^b	.421 ^b	.310 ^b

a. Grouping Variable: Yöntem

b. Not corrected for ties.

Çizelge 4.8’de Referans yöntem olan 3B tarayıcı ile Mimics karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda altı parametrenin de anlamlılık değerleri (p) 0.05’ten büyük çıkmıştır. Bu yüzden bu iki yöntem arasında mevcut parametrelerin birbirinden anlamlı derecede farklı olmadığı görülmektedir. Çizelge 4.10’da 3B Tarayıcı ile 3D Doctor yöntemlerinin parametreleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.10 Mann-Whitney Test.

	Yöntem	N	Mean Rank	Sum of Ranks
<i>L1</i>	3D Doctor	5	5.40	27.00
	3B Tarayıcı	5	5.60	28.00
	Total	10		
<i>L2</i>	3D Doctor	5	6.20	31.00
	3B Tarayıcı	5	4.80	24.00
	Total	10		
<i>L3</i>	3D Doctor	5	6.80	34.00
	3B Tarayıcı	5	4.20	21.00
	Total	10		
<i>L4</i>	3D Doctor	5	5.40	27.00
	3B Tarayıcı	5	5.60	28.00
	Total	10		
<i>L5</i>	3D Doctor	5	5.70	28.50
	3B Tarayıcı	5	5.30	26.50
	Total	10		
<i>D</i>	3D Doctor	5	6.80	34.00
	3B Tarayıcı	5	4.20	21.00
	Total	10		

Çizelge 4.11 Test İstatistikleri.

	L1	L2	L3	L4	L5	D
<i>Mann-Whitney U</i>	12.000	9.000	6.000	12.000	11.500	6.000
<i>Wilcoxon W</i>	27.000	24.000	21.000	27.000	26.500	21.000
<i>Z</i>	-0.104	-0.731	-1.358	-0.104	-0.210	-1.358
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>	0.917	0.465	0.175	0.917	0.834	0.175
<i>Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]</i>	1.000 ^b	.548 ^b	.222 ^b	1.000 ^b	.841 ^b	.222 ^b

a. Grouping Variable: Yöntem

b. Not corrected for ties.

3B Tarayıcı ile 3D Doctor yöntemlerinin istatistiksel karşılaştırılması sonucunda parametreler arasında anlamlı bir farklılık ($p < 0.05$) görülmemiştir. Çizelge 4.10'da 3D Doctor yöntemine ait sıra sayıları ortalamalarının 3B Tarayıcı yöntemine göre daha büyük olduğu gösterilmiştir. Çizelge 4.11'de L1 ve L4 parametrelerinin anlamlılık değerleri en büyük değer olan 1.000 olarak bulunmuştur. Bu da iki yöntem arasında bu parametreler özelinde hiçbir farkın olmadığını göstermektedir. Çizelge 4.12'de ise 3D

Slicer ile 3B Tarayıcı yöntemleri arasında karşılaştırma gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.12 Mann-Whitney Test.

	Yöntem	N	Mean Rank	Sum of Ranks
L1	3D Slicer	5	5.80	29.00
	3B Tarayıcı	5	5.20	26.00
	Total	10		
L2	3D Slicer	5	7.40	37.00
	3B Tarayıcı	5	3.60	18.00
	Total	10		
L3	3D Slicer	5	6.00	30.00
	3B Tarayıcı	5	5.00	25.00
	Total	10		
L4	3D Slicer	5	5.40	27.00
	3B Tarayıcı	5	5.60	28.00
	Total	10		
L5	3D Slicer	5	5.80	29.00
	3B Tarayıcı	5	5.20	26.00
	Total	10		
D	3D Slicer	5	6.60	33.00
	3B Tarayıcı	5	4.40	22.00
	Total	10		

Çizelge 4.13 Test İstatistikleri.

	L1	L2	L3	L4	L5	D
Mann-Whitney U	11.000	3.000	10.000	12.000	11.000	7.000
Wilcoxon W	26.000	18.000	25.000	27.000	26.000	22.000
Z	-0.313	-1.984	-0.522	-0.104	-0.313	-1.152
Asymp. Sig. (2-tailed)	0.754	0.047	0.602	0.917	0.754	0.249
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.841 ^b	.056 ^b	.690 ^b	1.000 ^b	.841 ^b	.310 ^b

a. Grouping Variable: Yöntem

b. Not corrected for ties.

Çizelge 4.13 içeriğindeki yöntemlere ait parametrelerin anlamlılık değerleri ($p < 0.05$) incelendiği zaman herhangi bir fark olmadığı görülmektedir. L4 parametresindeki

ortalama değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yöntemler arasında L2 parametresinde anlamlılığa ($p < 0.05$) ok yakın bir değer çıkmıştır.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu yüksek lisans çalışması ile medikal sektöründe kullanılan görüntüleme cihazlarından elde edilen radyografik görüntülerin, görüntü işleme metotları ile işlenerek yumuşak ve sert dokuların 3B olarak modellenmesi ve bu yönergeleri sağlayan yöntemlerin birbirleri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Çalışmada insan Radius kemiğine ait radyografik görüntüler kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada üç farklı radyografik görüntü işleme programı kullanılmış ve bunlar Mimics, 3D Doctor ve 3D Slicer olarak belirtilmiştir. Bu programlar yardımıyla insan Radius kemiğine ait 3B modelleri meydana getirilmiştir. Görüntü işleme programlarının doğruluğu ve aralarındaki benzerlikleri ortaya koymak için referans bir yöntem ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntem 3B Tarayıcı ile Radius kemiğinin taranması ve tersine mühendislik yöntemi ile 3B modellerin oluşturulması olarak belirtilmiştir.

Canlı dokularının medikal görüntüleme cihazları yardımıyla 3B modellemesi için birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılımlar kendi aralarında ücretli, ücretsiz ve hibrit olarak karşılaştırılmaktadır (Lo Giudice vd. 2020, Mandolini vd. 2022, Matsiushevich vd. 2019, Weissheimer vd. 2012, Soodmand vd. 2018). Mandolini vd. (2022) yaptıkları çalışmada patolojik femur başlarının rekonstrüksiyonu alanında en iyi 3B modelleme aracını belirlemek için geometrik, boyutsal ve kullanılabilirlik açısından üç farklı programı (Mimics, 3D Slicer, Syngo.via Frontier) karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda Mimics ve 3D Slicer programlarının geometrik, boyutsal ve kullanılabilirlik açısından yapılan karşılaştırmalarında Syngo.via Frontier programına göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Matsiushevich vd. (2019) yaptıkları çalışmada insan vücudunun beş farklı bölgesinde bulunan kemikleri kullanarak dört farklı ücretsiz medikal görüntüleme programlarını (3D Slicer, InVesalius, Itk-SNAP ve VuePACS3D) birbirleri ile karşılaştırmışlardır. VuePACS3D yazarların kendi enstitülerinin oluşturduğu bir programdır. Programların genel karşılaştırmaları sonucunda birbirlerinde bariz bir farklılıklarının olmadığı ve birbirlerinin yerine kullanılabileceklerini ortaya çıkarmışlardır. Benzer çalışmalar Weissheimer vd. (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarının amacı insan üst hava yolu sisteminin belirli bir bölgesinin altı farklı medikal görüntüleme programı (Mimics, ITK-Snap, OsiriX, Dolphin3D, InVivo Dental ve Ondemand3D) yardımıyla 3B

olarak modellenmesi ve modellerin birbirleriyle doğruluklarının karşılaştırılmasıdır. Çalışma sonucunda Mimics, Dolphin3D, ITK-Snap ve OsiriX programlarının birbirleriyle daha yakın, diğer programların daha uzak sonuçlar ortaya çıkardıkları elde edilmiştir.

Çizelge 4.6 incelendiği zaman, parametrelerin bütünü değerlendirildiğinde referans modele en yakın sapmaların Mimics programına ait olduğu görülmektedir. Bu değer literatürde yapılan test ile uyumludur (Soodmand vd 2018). Yazarlar çalışmalarında dört farklı segmentasyon programından elde edilen modeller ile 3B tarayıcıdan elde edilen modelleri karşılaştırmışlardır. Ortalama standart sapmanın 0,63 mm bulunduğu çalışmada ortalama negatif standart sapma 0,72mm ve ortalama pozitif standart sapma 0,66 mm olarak saptanmıştır. Bu verilere uygun olarak en düşük standart sapmanın Mimics programında olduğunu tespit etmişlerdir. Yine başka bir çalışmada benzer sonuçlar çıkarılmıştır (Lo Giudice vd. 2020). Altçenelerin hacmimi ölçmek için farklı yazılımlar kullanılarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın elde edilen sonuçlarına göre Mimics ve 3D Slicer programlarının Dolphin 3D ve InVesalius programlarına göre standart sapmalarının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Tez genel olarak değerlendirildiğinde dört farklı yöntemin birbirleri ile karşılaştırılması, üstünlük ve zayıf yönlerinin belirtilmesi ve referans yöntemine göre kıyaslanması olarak ortaya konulmuştur. Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre 4 farklı grup arasında anlamlı olarak ($p<0.05$) bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır. Hem dört grup arasında yapılan Kruskal Wallis testi, hem de her iki grup arasında yapılan Mann Whitney U testi ile anlamlılık değeri ($p<0.05$) yakalanamamıştır. Bu sonuçlar birtakım kısıtlamaların oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Bu kısıtlamalar;

- Çalışmada kullanılan örneklem sayısının (beş) yeterli olmaması. Bu kapsamda benzer çalışmalara uygun olarak belirlenen örneklem sayıları seçilebilir (Lo Giudice vd. 2020, Kresanova ve Kostolny 2018, Nemec vd. 2015).
- Radyografik görüntülerden 3B modellerin oluşması için kullanılan programların otomatik segmentasyon işleminden sonra manuel düzeltmelere izin vermesi ve operatörden kaynaklanan hataların ortalamasının büyük olması
- Kesit kalınlıklarının düşürülmesi ile birlikte Radyografik görüntü sayısının

artırılması

Yukarıda belirtilen kısıtlamaların giderilmesi ile daha uygun sonuçların ve gruplar arasında anlamlılık değerlerinin yakalanması sağlanabilir. Gerçekleştirilen istatistik değerlendirme bizlere; Çalışmada kullanılan programlar arasında herhangi anlamlı bir fark olmadığı ve medikal görüntülerden 3B modellerin oluşturulması işleminde bu üç programında kullanılabilirliğinin olduğunu göstermiştir.

İleriki çalışmalarda istatistik karşılaştırmalarının yanında tersine mühendislik karşılaştırmalarında yapılması sağlanabilir. Tersine mühendislik karşılaştırma işlemleriyle çalışma desteklenebilir. Ayrıca istatistik çalışmanın yanında programlar arasında kullanıcı bazlı bir takım nitel gözlemler yapılarak puanlar verilebilir ve bu nitel gözlem ile çalışma desteklenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdel M, Ebrahim B, 2015, 3D Laser Scanners' Techniques Overview, International Journal of Science and Research, 10, 323-331.
- Ahmad M, 2019, Atıksuların Mikrodalga ile Ön Arıtımı, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Bursa.
- Akerdad M, Aboutajeddiae A, Elmajdoubi M, Supporting Product Development Activities By Reverse Engineering Technique, Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management 2020, August 10 – 14, Detroit – Michigan - USA.
- Aksay S, 2017, Tersine Mühendislik Yöntemleri ile Elde Edilen Beton Numunenin Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Modellenmesi ve Model Geometrilerinin İncelenmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, Manisa.
- Bertoni A, 2019, A Reverse Engineering Role-Play to Teach Systems Engineering, Education Sciences, 9, 30.
- Bhidé A, Datar S, Stebbins K, 2019, Case Histories of Significant Medical Advances: Development of Computed Tomography, Harvard Business School Accounting & Management Unit Working, 20–24.
- Boyette M, Using Reverse Engineering in The Classroom to Teach Creativity, Proceedings of The ASEE Southeastern Section Conference 2004.
- Carfagni M, Facchini F, Furferi R, Ghionzoli M, Governi L, Messineo A, vd., 2018, A Semi-Automatic Computer-Aided Method for Personalized Vacuum Bell Design, Computer-Aided Design and Applications, 15, 247-255.
- Çelebi A, Tosun H, Önçağ A, 2017, Hasarlı Bir Kafatasının Üç Boyutlu Yazıcı ile İmalatı ve İmplant Tasarımı, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 1, 27-35.
- Deliktaş A O, 2022, Deri Çanta Üretiminde Tersine Mühendislik Uygulamaları, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 112s, İzmir.

- Demir H, 2018, CAD Datası Olmayan Parçaların Tersine Mühendislik Metodu ile CAD Datalarının Oluşturulması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, Elazığ.
- Fidan D, Oruç M, Hamal S, Fidan Ş, 2022, Tersine Mühendislik Uygulamalarında Yersel Lazer Tarayıcıların Kullanım Olanaklarının Araştırılması; Klasik Otomobiller Örneği, Türkiye Lidar Dergisi, 4, 1–10.
- Genç D, 2016, Tek Foton Emisyon Bilgisayarlı Tomografi - Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleme Cihazının Kalite Kontrolleri, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, İstanbul.
- Gryglewski R, 2016, Kazimierz Noiszewski 1859-1930, Portrety uczonych : Profesorowie Uniwersytetu Warszawskiego.
- Gupta C, Kalthur S, Malsawmzuali J, D'Souza A, 2015, A Morphological and Morphometric Study of Proximal and Distal Ends of Dry Radii With Its Clinical Implications, Biomedical Journal, 38.
- Gülöksüz U, 2016, Acil Serviste Maksillofasiyal Bilgisayarlı Tomografi Çekilen Travma Hastalarında Klinik Bulguların Bilgisayarlı Tomografi Sonuçları ile İlişkisinin Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıpta Uzmanlık, 91s, Ankara.
- Haşçelik A, 2021, Tersine Mühendisliğin Makine Mühendisliği Alanındaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme, Journal of Characterization, 1, 42–53.
- İmiroğlu H, Tosun Z, Kaymaz İ, Sever C, Akdağ O, Selimoğlu M, 2014, Yeni Bir Tmj İmplant Tasarımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 2, 199-210.
- Işık U, 2019, Üç Boyutlu Koordinat Ölçme Cihazı (CMM) ile Optik Tarama Cihazının Performanslarının Karşılaştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Karabük.
- Işık E, 2020, 3d Cad Yazılımları Kullanarak Üç Boyutlu Tarama Verisi ile Tersine Mühendislik Uygulaması. Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Kütahya.
- Kersten T, Mechelke K, Maziull L, 2015, 3D Model of Al Zubarah Fortress in Qatar –

- Terrestrial Laser Scanning vs Dense Image Matching, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 5, 1-8.
- Köse A, 2014, Erişkin Önkol Diafiz Kırıklarında Kilitli İntramedüller Radius Ulna Çivileri ile Cerrahi Tespit Uygulamalarımızın Retrospektif Olarak İncelenmesi. Atatürk üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıpta Uzmanlık, 124s, Erzurum.
- Kresanova Z, Kostolny J, 2018, Comparison of Software for Medical Segmentation, Central European Researchers Journal, 4, 66-80.
- Kumar L, Shuaib M, Tanveer Q, Kumar V, Javaid M, Haleem A, 2018, 3D Scanner Integration with Product Development. International Journal of Engineering & Technology, 7, 220-225.
- Lalone E, Willing R, Shannon H, King G, Johnson J, 2015, Accuracy Assessment of 3D Bone Reconstructions Using CT: An Intro Comparison, Medical Engineering and Physics, 37, 729-738.
- Lo Giudice A, Quinzi V, Ronsivalle V, Farronato M, Nicotra C, Indelicato F, Isola G, 2020, Evaluation of Imaging Software Accuracy for 3 Dimensional Analysis of The Mandibular Condyle. A Comparative Study Using a Surface-to-Surface Matching Technique, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17, 4789.
- Luenam S, Kosiyatrakul A, Hansudewechakul C, Phakdeewisetkul K, Lohwongwatana B, Puncreobutr C, 2018, The Patient-Specific Implant Created with 3D Printing Technology in Treatment of The Irreparable Radial Head in Chronic Persistent Elbow Instability, Case Reports in Orthopedics.
- Mahaisavariya B, Saekee B, Sitthideripratip K, Oris P, Tongdee T, Bohez E, vd., 2004, Morphology of The Radial Head: A Reverse Engineering Based Evaluation Using Three - Dimensional Anatomical Data of Radial Bone, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 218, 79-84.
- Mandolini M, Brunzini A, Facco G, Mazzoli A, Forcellese A, Gigante A, 2022, Comparison of Three 3D Segmentation Software Tools for Hip Surgical Planning, Sensors, 22, 5242.
- Mathukumar S, Nagarajan V, Radhakrishnan A, 2019, Analysis and Validation of Femur

- Bone Data Using Finite Element Method Under Static Load Condition, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 233, 5547-5555.
- Matsiushevich K, Belvedere C, Leardini A, Durante S, 2019, Quantitative comparison of freeware software for bone mesh from DICOM files, Journal of Biomechanics, 84, 247-251.
- Misir A, Öztürk K, Kıskaçan T B, Yıldız K İ, Gür V, Sevecan A, 2017, OTA/AO 23C3 Distal Radius Kırığı Olan Hastalarda Kırık Hatları ve Parçalanma Bölgelerinin Haritalanması, 27. Ulusal Türk Ortopedi ve Travmatoloji Kongresi, 24 – 29 Ekim, Antalya, 69.
- Modi Y, 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, 1-11.
- Nemec S F, Molinari F, Dufresne V, Gosset N, Silva M, Bankier A A, 2015, Comparison of Four Software Packages for CT Lung Volumetry in Healthy Individuals, European radiology, 25, 1588-1597.
- Obert L, Loisel F, Gasse N, Lepage D, 2015, Distal Radius Anatomy Applied to The Treatment of Wrist Fractures by Plate: A Review of Recent Literature, Société Internationale de Chirurgie Orthopédique et de Traumatologie, 1.
- Osman H, 2015, Birleşik Bilgisayarlı Tek Foton Emisyon Tomografisi/Bilgisayarlı Tomografi (SPECT/CT) ile Birleşik Pozitron Emisyon Tomografisi/Bilgisayarlı Tomografi (PET/CT) Sistemlerinde Tomografik Görüntülere Sistem Yazılım Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi, Ankara Üniversitesi, Nükleer Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 159s, Ankara.
- Özsoy K, Kayacan M, 2018, Ergiyik Biriktirme Yöntemiyle Hafifletilmiş Kişiyeye Özel Kafatası İmplantın Hızlı Prototiplenmesi, Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi, 1, 1–11.
- Patil V, Pai K, Naik N, 2018, A Comparative Study on Determination of Pulp/Tooth Area Ratio Using MIMICS® and Adobe Photoshop CS® for Estimation of Age by Cameriere's Method, World Journal of Dentistry, 9, 418-422.

- Paulsen F, Waschke J, 2011, Sobotta İnsan Anatomisi Atlası Genel Anatomi ve İskelet-Kas Sistemi, 7th edn. İstanbul: Beta Basın Yayım Dağıtım.
- Raja V, Fernandes K, 2009, Reverse Engineering an Industrial Perspective, Springer Science & Business Media, 241s, Switzerland.
- Rayna A, Francis Y, Baskaran S, Gouthaman P, Begum Z, Guruswami K, vd., 2018, Morphometric Study of Proximal and Distal End of Radius and Its Clinical Significance, Journal of Clinical and Diagnostic Research, 12.
- Sabuncu A, Özener H, 2020, Mimari Dökümantasyonda Yersel Lazer Tarama Teknolojisi Kullanımı: Tarihi Sismoloji Binası Örneği, Turkish Journal of Remote Sensing and GIS, 1, 45–52.
- Sarıtaş A, 2022, Açık Kaynaklı Medikal Programlar Kullanılarak Üç Boyutlu Radius Kemik Modellerinin Morfometrisinin Değerlendirilmesi. Afyonkarahisar Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Afyonkarahisar.
- Sarıtaş M Z, 2015, Adli Tıp Uygulamalarında 3D (Üç Boyutlu) Teknolojinin Kullanımı. Pamukkale Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıpta Uzmanlık, 88s, Denizli.
- Schmauss D, Haeberle S, Hagl C, Sodian R, 2014, Three-Dimensional Printing in Cardiac Surgery and Interventional Cardiology: A Single-Centre Experience, European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, 47, 1044-1052.
- Soodmand E, Kluess D, Varady P A, Cichon R, Schwarze M, Gehweiler D, Woiczinski M, 2018, Interlaboratory Comparison of Femur Surface Reconstruction from CT Data Compared to Reference Optical 3D Scan, Biomedical Engineering Online, 17, 1-10.
- Şahin O, 2018, Tersine Mühendislik Yöntemi ile Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve Kalıp Dolum Parametrelerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, Sakarya.
- Türkücü T, Börklü H, 2017, Tersine Mühendislik Yaklaşımına Dayalı Yeni Bir İmalat İçin Tasarım İşlem Modeli, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6, 91-104.

- Uslu Ü, 2006, Tomografik Görüntü Verilerinden 3 Boyutlu CAD Modelinin Oluşturulması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s, İstanbul.
- Weissheimer A, De Menezes L M, Sameshima G T, Enciso R, Pham J, Grauer D, 2012, Imaging software accuracy for 3-dimensional analysis of the upper airway, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 142, 801-813.
- Yalçinkaya S, Yıldız B, Borak M, 2019, Optical 3D Scanner Technology, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3, 67-75.
- Zhang X, Zhang K, Pan Q, Chang J, 2019, Three-Dimensional Reconstruction of Medical Images Based on 3D Slicer, Journal of Complexity in Health Sciences, 2, 1-12.

İnternet Kaynakları

- 1- <http://www.akincimakina.com.tr/tersine-muhendislik-hizmeti-kullanim-alanlari/>, 12 6, 2022
- 2- https://www.qpluslabs.com/products/zeiss-accura/?_page=2, 11.02.2023
- 3- <https://www.slideshare.net/SolomonTekeste/lecture-09-coordinate-measuring-machine-cmm>, 09.02.2023
- 4- <https://www.slideshare.net/RajabhauMatePatil1/coordinate-measuring-machine-cmm>, 28.08.2020
- 5- <https://docplayer.biz.tr/49319237-Havacilikta-tersine-muhendislik-uygulamalari-ozgecan-yildiz-1.html>, 12 6, 2022
- 6- <http://www.barissamanci.net/Makale/41/sentetik-aciklikli-radar-sar-nedir/>, 09.03.2023
- 7- <https://blog.egesavtek.com/tomografi-bt-nedir/>, 09.02.2023
- 8- <https://muhendisgelisim.com/mr-manyetik-rezonans-goruntuleme-cihaz-nedir/>, 08.04.2020
- 9- www.kacarlarmakina.com: <https://www.kacarlarmakina.com/tersine-muhendislik>, 2 18, 2023
- 10- <https://www.3d-scantech.com/>, 09.02.2023

- 11- <https://top3dshop.com/product/scantech-kscan-magic-3d-scanner>, 08.02.2023
- 12- <https://www.poligonmuhendislik.com/urunlerimiz/3b-tarayicilar/scantech>,
- 13- <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/the-radius-and-the-ulna>, 10.01.2023

