



**CAD DATASI OLMAYAN PARÇALARIN
TERSİNE MÜHENDİSLİK METODU İLE
CAD DATALARININ OLUŞTURULMASI**

Mak. Müh. Hakkı DEMİR

**Yüksek Lisans Tezi
Makina Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ
EYLÜL-2018**

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAD DATASI OLMAYAN PARÇALARIN
TERSİNE MÜHENDİSLİK METODU İLE
CAD DATALARININ OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisi Hakkı DEMİR

(111119107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17 Ağustos 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Eylül 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vedat SAVAŞ (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr.Çetin ÖZAY (F.Ü.)

Dr. Öğretim Üyesi Mehmet ALTUĞ (İ.Ü.)

EYLÜL-2018

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAD DATASI OLMAYAN PARÇALARIN
TERSİNE MÜHENDİSLİK METODU İLE
CAD DATALARININ OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisi Hakkı DEMİR

(11119107)

Anabilim Dalı: Makina Eğitimi

Programı: Talaşlı Üretim

Danışman: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 17 Ağustos 2018

AĞUSTOS-2018

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca benden yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın, Prof. Dr. Vedat SAVAŞ' a, ayrıca bilgi ve fikirlerinden yararlandığım İnönü Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mehmet ALTUĞ' a,

Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı, 2011 yılı Teklif Çağrısı, Ar-Ge ve Yenilikçilik Mali Destek Programı, Kişiyeye Özel Dış Protez Uygulamaları Projesi verileri ve proje eğitim notlarından faydalanmam için tüm verileri benimle paylaşan ve tezimde kullanmam için bana izin veren Bursa ili, Tophane Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Makine Ressamlığı Alanı öğretmenleri Nuray EREN, Sinan EZER ve Gürbüz ÖZAY' a,

Hasta tomografi görüntülerini tezimde kullanmam için izin dilekçem karşılığında bana veren, İnönü Üniversitesi, Turgut Özal Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim Dalı yetkililerine,

RapidForm, OptoCAT programından faydalanarak verileri oluşturmam ve program ara yüz resimlerini tezimde kullanmam için izin veren İnfotron firmasına,

Beni bu günlere getiren anneme ve babama, çalışmam boyunca bana tahammül eden eşime ve zaman ayıramadığım çocuklarıma,

Teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Hakkı DEMİR
ELAZIĞ- 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLOLAR LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRILMASI	3
3. TERSİNE MÜHENDİSLİK	6
3.1. Tersine Mühendisliğin Tanımı	6
3.2. Tersine Mühendislikte Amaç	6
3.3. Tersine Mühendislikte Süreç	7
3.4. Tersine Mühendisliğin Günümüz Endüstrisinde Kullanım Sebepleri.....	8
3.5. Tersine Mühendislikte İşlem Basamakları	9
4. TERSİNE MÜHENDİSLİKTE VERİ TOPLAMA VE YÖNTEMLERİ.....	11
4.1. Temaslı Veri Toplama Yöntemleri.....	14
4.1.1. Mekanik (Robotik) Kollar	14
4.1.2. Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM)	15
4.2. Temasız Veri Toplama Yöntemleri	16
4.2.1. Optik Yöntemler	17
4.2.1.1. Lazer Üçgenleme;	24
4.2.1.2. Uçuş Zamanı;	25
4.2.1.3. İnterferometre;	25
4.2.1.4. Yapısal Işıklandırma;	27
4.2.1.5. Stereo Görüntü Analizleri;	28
4.2.1.6. Fotogrametri Yöntemi	29
4.2.1.7. Topografik Yöntemi	30
4.2.2. Akustik Yöntemi	31
4.2.3. Manyetik Alan Yöntemi	32
4.3. Tersine Mühendislikte Veri Toplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	32
5. TERSİNE MÜHENDİSLİK, UYGULAMA VE KULLANIM ALANLARI. 35	35
5.1. Otomotiv.....	36
5.2. Hava, Deniz, Uzay Sanayi ve Askeri Araç Modelleme	36
5.3. Mimari ve İnşaat Sektöründe	38
5.4. Tıp ve Medikal	39
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ	40
6.1. Deneysel Çalışma 1	41
6.1.1. Uygulama Örneği 1	50
6.1.2. Uygulama Örneği 2	55
6.1.3. Sanal Cerrahinin Planlanması ve Örnek Uygulaması	57
6.1.4. Robotik Cerrahinin Planlanması ve Örnek Uygulaması	60

6.2.	Deneysel Çalışma 2	64
6.2.1.	1. Aşama: Nokta Bulutu Forma Getirip, STL Formatta Kayıt Yapma	64
6.2.2.	2. Aşama STL Formatındaki Dosyayı CAD Formatında Kayıt Yapma.....	76
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
7.1.	Sonuçlar.....	90
7.2.	Öneriler.....	92
	KAYNAKÇA	93
	ÖZGEÇMİŞ.....	



ÖZET

Tersine mühendislik, önceden üretilmiş veya mevcut olan bir model ürün-den faydalanılarak model ürünün üretimi için gerekli olan tasarım ve verilerini elde edilmesidir. Tasarım, üretim ve modernizasyonu imkansız olan ve hatta gözle görülemeyen model ürünlerde bile günümüz teknoloji gelişimiyle beraber tersine mühendislikle artık yapılabilir hale gelmektedir. Örneğin insan vücudunun tomografi görüntüsünden faydalanılarak kişisel özelliklerine göre dış ve iç organlarının tasarımı ve kişiye özel protez üretimi yapılabilir duruma gelmektedir. Üretimi yapılan protezlerin robotik ve sanal cerrahi yöntemlerinden faydalanılarak çok daha hızlı ve başarılı bir şekilde ameliyathanelerde vücuda takılması sağlanmıştır.

Tez çalışmasında uyluk (femur) ve kaval (tibia) kemik doku kaybı olan bir hastanın tomografik görüntüsünden faydalanılarak kişiye özel diz protezi ve protezin takılmasında kullanılacak kemik kesi kılavuz parçalarının tasarımı ve üretimi için kemik geometri dokusunun sayısallaştırıcı programlar kullanılarak 3B model görünümünün elde edilmesi çalışıldı.

Ayrıca tasarımı ve teknik resim çizimi imkansız gibi görünen, insana ait prototipi üretilen bir uyluk (femur) kemiğinin, tekrar üretilmek istenmesi durumunda, üretimi için gerekli 3B model görünümünün ve teknik resminin elde edilebilmesi için tersine mühendislikte optik tarama yöntemini kullanılarak 3B CAD model görünümüne nasıl getirildiği gösterildi.

Böylece elde edilen model ürünün 3B CAD model görüntüleri ile modernizasyon ve tasarımları yapılarak tekrar üretilir.

Anahtar Kelimeler: Tersine Mühendislik (TM), Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT), Bilgisayarlı Tomografi (BT), 3B Optik Tarama, Biyomedikal

SUMMARY

Cad Data Without Parts, Reverse Engineering And Method Formation Of Cad Datas

Reverse engineering is the handling of designs and data required for the production of a model product using a pre-manufactured or existing model product. Design, production and modernization are impossible, and even in the case of model products that can not be overlooked, reverse engineering can be done with modern technology development. For example, by using the tomography image of the human body, it is possible to design the external and internal organs according to their personal characteristics and to produce the custom prosthetic prosthesis. By using the robotic and virtual surgical methods of the manufactured prosthesis, it is possible to attach to the body in the operating theater much more quickly and successfully.

Using the tomographic image of a patient with thigh (femur) and tibial bone loss in the thesis study, we tried to obtain a 3D model view using bone geometry tissue-to-digitizer programs for the design and production of bone incision guide pieces to be used in the attachment of personal knee prosthesis and prosthesis .

In addition, if it is desired to reproduce a thigh (femur) bone of a human-made prototype-pi, which seems impossible to design and draw a technical drawing, it is possible to obtain a 3D model view for production and a 3D CAD how it was brought to the model view.

The resulting model can be reproduced with modern 3D CAD model views and modernization designs.

Key Words: Reverse Engineering (RE), Computer Aided Design (CAD), Computerized Tomography (CT), 3D Optic Scan, Biomedical

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Mühendislik ürünlerinin üretim süreci [16].	7
Şekil 3.2. Tersine mühendislik temel işlem akış diyagramı [15].	9
Şekil 3.3. Tersine mühendislik prosesi işlem basamakları [15, 16, 18].	10
Şekil 4.1. Sayısallaştırılmış 3B model femur kemiği nokta bulutu verisi (OPTOCAT programı)	11
Şekil 4.2. 3B Geometri ve oluşturulan veriler için sayısallaştırma teknikleri şeması [16].	12
Şekil 4.3. Tersine mühendislikte kullanılan veri toplama yöntemleri [15].	13
Şekil 4.4. Mekanik (robotik) kollar [21].	14
Şekil 4.5. Koordinat ölçüm makineleri (CMM) [22].	15
Şekil 4.6. Temassız tarama yöntemi ile veri elde etme işlemi [23].	16
Şekil 4.7. Tarama yapılan parmak izi verisi [27].	18
Şekil 4.8. Kalite kontrol için optik kaporta taraması [28].	19
Şekil 4.9. Lazer tarama ile kalite kontrol rapor örneği [29].	19
Şekil 4.10. Kalite kontrol için optik kaporta kalıp taraması [30].	20
Şekil 4.11. Işık kaynağı projeksiyondan farklı renklerde saçaklar halinde yansıması [32].	21
Şekil 4.12. Tek, çift ve asimetric kameralı optik tarama sistemleri (Smart SCAN) [33].	22
Şekil 4.13. Tek kameralı sistem üçgenleme açısı [6].	22
Şekil 4.14. Asimetric yerleştirilmiş çift kameralı sistem (Breuckmann STEREOSCAN).	23
Şekil 4.15. Lazer ışın yansıması ile oluşan lazer üçgenleme açısı [35].	24
Şekil 4.16. Uçuş zamanına göre tarama yapan döner tablalı cihaz (EinScan) [36].	25
Şekil 4.17. Lazer interferometrenin takım tezgâhları doğrusal hataların ölçümü [32].	26
Şekil 4.18. İnterferometre boru incelemesi NOVACAM [37].	26

Şekil 4.19. Yapısal ışıklandırma ile model üzerinde oluşan çizgisel desen [38].....	27
Şekil 4.20. Yapısal ışıklandırma ile oluşan desenin çizgisel şerit geometrisi [39].	28
Şekil 4.21. Stereo analiz sistemiyle elde edilen derinlik haritası [40].....	28
Şekil 4.22. Yersel fotogrametri yöntemi ile model geminin üst, ön ve alt görüntüsü [41].	29
Şekil 4.23. Fotogrametri gemi fotoğraf çekimi sonrası nokta eşleştirmesi [41].....	29
Şekil 4.24. Model geminin oluşturulan 3B modeli üst görünüşü [41].	29
Şekil 4.25. Topografik yöntem ile havadan ve yerden foto çekimi [42].	30
Şekil 4.26. Havadan topografik yöntemiyle oluşturulan 3B katı model harita [43].....	30
Şekil 4.27. Akustik yöntem ile kesitler halinde dinamik görüntüleme [44].....	31
Şekil 4.28. Sualtı akustik kamera görüntüsü elde edilmesi [44].	31
Şekil 4.29. Manyetik alan yöntemi [39]	32
Şekil 5.1. Otomotiv sanayinde kullanımı [45].....	36
Şekil 5.2. Hava, deniz ve uzay sanayinde, askeri araç ve parça modelleme ve kalite kontrol [45].....	37
Şekil 5.3. Mimari ve inşaat sektörü bina tasarımı, restorasyon ve kültürel miras [45].	38
Şekil 5.4. Tıp ve medikal alanda protez tasarımı [45, 46].....	39
Şekil 6.1. Medikal görüntü formatı DICOM görüntüsü	41
Şekil 6.2. DICOM formatındaki görüntüyü DICOMDIR adlı dosyayı seçerek açma	41
Şekil 6.3. DICOM formatındaki CT görüntü seçimi	42
Şekil 6.4. 3B model oluşturma sihirbazı 3D Wizard	42
Şekil 6.5. İmage Calibration Parameters diyalog penceresi	43
Şekil 6.6. Define Objects diyalog penceresi.....	43
Şekil 6.7. Draw Region Of Interest (ROI).....	44
Şekil 6.8. İnteractive Segmentation diyalog penceresi.....	44
Şekil 6.9. İnteractive Segmentation, Select Boundary Type sekmesi	45
Şekil 6.10. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32830-40894 aralığı	46
Şekil 6.11. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32835-40894 aralığı	46

Şekil 6.12. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32840-40894 aralığı	46
Şekil 6.13. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 33210-40894 aralığı	46
Şekil 6.14. Complex Surface Rendering diyalog penceresi	47
Şekil 6.15. Complex Surface Rendering yapılan kemik dokusu görünümü.....	47
Şekil 6.16. Tools- Smooth Surfaces yapılmış pürüzsüz bir yüzey dokusu	48
Şekil 6.17. Tools-Simplify Surfaces yapılmış sadeleştirilmiş bir yüzey dokusu	48
Şekil 6.18. Tools-Refine Models yapılmış gereksiz noktalardan arındırılmış yüzey dokusu	48
Şekil 6.19. View-Object sekmesinden renk ve desen verilen kemik dokusu	49
Şekil 6.20. File-Export Model sekmesi ile STL formatında kayıt yapma	49
Şekil 6.21. Protez uygulaması yapılan göz ve göz çukuru oluşan hasta [45].....	50
Şekil 6.22. Bilgisayarlı tomografi görüntüsü [51].....	50
Şekil 6.23. Bilgisayarlı tomografi görüntü 3B yüzey dokusu formuna çevrilmiş hali [51].	51
Şekil 6.24. Göz çukuruna yapılacak protezin sayısallaştırıcı programlarla tasarlanması [51].	51
Şekil 6.25. Protez parçada göz bölgesinin tasarlanması [51].	52
Şekil 6.26. Protezin takılıp çıkarılabilmesi için pim deliklerinin konumları belirlenmesi [51].	52
Şekil 6.27. Protez üretimi için 3B model görünümünde tasarlanan kalıp [51].	52
Şekil 6.28. Tasarımı yapıldıktan sonra üretilen protez kalıbı [51].	53
Şekil 6.29. Silikondan kalıpta üretimi yapılan protez [51].....	53
Şekil 6.30. Protezinin ten rengine uyumu için boyanması [51].	53
Şekil 6.31. Silikon proteze, protez göz ve kirpik eklenmesi [51].....	54
Şekil 6.32. Protez uygulaması tamamlanan hastaya takılmadan önceki ve sonraki hali [51, 52, 54].	54
Şekil 6.33. Medikal model protez takılmış hasta[56].....	55
Şekil 6.34. Ortopedik cerrahi kemik kesi kılavuz parçaları [45].....	56
Şekil 6.35. Ortopedik cerrahi kılavuzun takılma doğruluğu OMNI [57]	56

Şekil 6.36. Bilgisayarlı Tomografi görüntüden 3B model kemik dokusu elde edildi [58].	57
Şekil 6.37. Protez takılması için uygun kesi düzlem açılarının belirlenmesi [58].	57
Şekil 6.38. Protez takılması için uygun tasarlanan kemik kesi kılavuzları [58].	58
Şekil 6.39. Kemik kesi kılavuzunun takılması [59].	58
Şekil 6.40. Femur (uyluk) kemiğinin kesi kılavuzları ile kesme plakasında kesilmesi [58].	59
Şekil 6.41. Tibia (kaval) kemiğinin kesi kılavuzları ile kesme plakasında kesilmesi [58].	59
Şekil 6.42. Robotik cerrahi ile ameliyat edilme yöntemi OMNIBotics [60].	60
Şekil 6.43. Robotik cihaz ile kemik konumu algılayıcı robotik kolların takılması OMNIBotics [60].	61
Şekil 6.44. Temaslı veri toplama yöntemi ile kemik geometrisinin tanımlanması MAKOplasty [61].	61
Şekil 6.45. Kemik geometrisi tanımlamasının cihaz monitöründen kontrolü OMNIBotics [58, 60].	62
Şekil 6.46. Robotik cerrahide cihaz görüntü konsolu OMNIBotics [60].	62
Şekil 6.47. Robotik cerrahide cihaz görüntü konsolu kemik konum açısı OMNIBotics [60].	63
Şekil 6.48. Robotik cerrahide kemik kesi işlemi OMNIBotics [60].	63
Şekil 6.49. Prototip üretilmiş uyluk (femur) kemiği	64
Şekil 6.50. Optik tarama cihazı (Breuckmann SmartSCAN)	64
Şekil 6.51. Tarama sistemi OPTOCAT programı ara yüzü.	65
Şekil 6.52. Model ürünün tarama sehпасına konulması (Breuckmann SmartSCAN).	65
Şekil 6.53. Model ürün taraması yapılacak program ara yüzü	66
Şekil 6.54. ABSBRIGHT Brightness-and Aperture Adjust diyalog kutusu.	66
Şekil 6.55. Lazer ışınlarının model ürün üzerinden yansıması.	67
Şekil 6.56. Lazer ışınlarının birbirleri üzerine denk getirilmesi.	67
Şekil 6.57. AutoExposure ikonu seçimi	68
Şekil 6.58. İlk taramada elde edilen nokta bulutu formda veri.	68
Şekil 6.59. Model ürünün konumunun değiştirilerek ikinci taramanın yapılması	69

Şekil 6.60. 3D View Matching diyalog kutusu ile yüzey eşleştirmenin yapılması	69
Şekil 6.61. Sarı renk bayrak (mark) ile birinci yüzey eşleştirme işleminin yapılması	70
Şekil 6.62. Mor renk bayrak (mark) ile ikinci yüzey eşleştirme işleminin yapılması	70
Şekil 6.63. Yeşil renk bayrak (mark) ile üçüncü yüzey eşleştirme işleminin yapılması	71
Şekil 6.64. 3D View Aligment diyalog kutusu	71
Şekil 6.65. Model ürünün nokta bulutu verisinden yüzey eşleştirme yapılan hali	72
Şekil 6.66. Model ürünün duruş pozisyonunun değiştirilerek yeni tarama yapılması	72
Şekil 6.67. Yeni taramalarda hatalı yüzey mark bayrak seçimi	73
Şekil 6.68. Hatalı bayrak (mark) nokta seçimlerinde oluşan hatalı nokta bulutu verisi	73
Şekil 6.69. Model ürün nokta bulutu formunda 3b geometri verisi	74
Şekil 6.70. Model ürünün 53 adet tarama sonucunda nokta bulutu formda oluşan görüntüsü	74
Şekil 6.71. Model ürün tarama sonrası yüzey formlu görünümü	75
Şekil 6.72. STL formatta kayıt yapma	75
Şekil 6.73. RapidForm XOR programı ara yüzü	76
Şekil 6.74. İnsert-İmport sekmesinden STL formatındaki kayıtlı dosyayı açma	76
Şekil 6.75. İmport edilen dosya	77
Şekil 6.76. İşlem Ağacında (Feature) İşlem Yapmadan Önce Seçim Yapma	77
Şekil 6.77. Mesh sekmesi seçimi mesh seçenekleri	78
Şekil 6.78. Mesh seçeneklerinden Healing Wizard	78
Şekil 6.79. Sekme önizleme ve onay sekmeleri	78
Şekil 6.80. Healing Wizard sekmesi	79
Şekil 6.81. Smooth sekmesi	79
Şekil 6.82. Global Remesh sekmesi	80
Şekil 6.83. Onaylama işlemi yaparak mesh işleminin tamamlanması	80
Şekil 6.84. Yüzeyin surface yani katı olmadığı için pasif katı model komutları	80
Şekil 6.85. Auto Surfacing sekmesi	81

Şekil 6.86. Evenly Distributed Network sistemi ile yüzey ağı oluşturmaı	81
Şekil 6.87. Evenly Distributed Network sistemi ile katı yüzey oluşturmaı	82
Şekil 6.88. Feature Following Network sistemi ile yüzey ağı oluşturmaı	82
Şekil 6.89. Feature Following Network sistemi ile yüzey ağı ve düzenlemesi	83
Şekil 6.90. Auto Surfacing sonrası model ürün katı yüzey kaplanmış formu	83
Şekil 6.91. Model yüzeyinin katı yüzey (surface) olduğunda aktif katı model komutları ..	83
Şekil 6.92. File-Export ile dosyayı farklı program formatında kayıt yapma.....	84
Şekil 6.93. File-liveTransfer(TM) To ile dosyayı farklı program formatında kayıt yapma	84
Şekil 6.94. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 1	85
Şekil 6.95. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 2	85
Şekil 6.96. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 3	86
Şekil 6.97. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 4.....	86
Şekil 6.98. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 5	87
Şekil 6.99. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 6	87
Şekil 6.100. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 7	88
Şekil 6.101. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 8	88
Şekil 6.102. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 9	89
Şekil 6.103. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 10	89
Şekil 7.1. Tomografi görüntü çekimi katman aralığı 2mm olan kemik dokusu görüntüsü .	90
Şekil 7.2. Pürüzsüz bir kemik dokusu görüntüsü	91

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Temaslı Tarama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları..... 33

Tablo 4.2. Temassız Tarama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları 34



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu
BDİ	: Bilgisayar Destekli İmalat
BDM	: Bilgisayar Destekli Mühendislik
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ	: Bilgisayar Destekli Üretim
BSD	: Bilgisayarlı Sayısal Denetim
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CDD	: Dijital Fotoğraf Kamera
CIA	: Bilgisayar Destekli Analiz
CMM	: Koordinat Ölçüm Makineleri
CNC	: Bilgisayar Kontrollü Tezgah
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
DICOM	: Tıpta Dijital Görüntüleme ve İletişim Dosya Formatı
KÖM	: Koordinat Ölçüm Makinesi
MR	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
TM	: Tersine Mühendislik
TYT	: Tersine Yenilikçi Tasarım

1. GİRİŞ

Ürün tasarımları ve teknoloji durmaksızın değişmekte ve ilerlemekte olup hayatın her alanında yeni teknolojik gelişmelere ve tasarımlara ihtiyaç duyulmasını sağlamaktadır. Tasarlanan ürünler gelişen yeni teknolojiye göre daha karmaşık hatlara sahip olarak tasarlanırlar. Günümüzdeki tasarımlarda daha kişisel ve daha özelleştirilmiş ürünler talep edilmektedir. Tasarım sürecindeki değişkenlik rekabet güçlerini artırmak isteyen işletmeleri yeni üretim ve pazarlama tekniklerini uygulamaya zorlamaktadır. Bu işletmeler, müşteri ihtiyaçlarını karşılayarak kâr elde etmek için geniş ürün çeşitleriyle pazara hâkim olmakla beraber, pazara sürekli yeni tasarım ürünleri sunmaktadır. Tasarlanan bu ürünlerin müşteri isteklerinin eksiksiz karşılanmış olması ve müşteri memnuniyetinin üst düzeyde olması ise işletmelere rekabet etme gücü açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu koşulları sağlayan işletmeler, müşterilere özelleştirilmiş, düşük maliyetli ve çok kaliteli tasarım ürünlerini sunmayı hedeflemektedirler.

Hedeflenen tasarım ürününü oluşturmak kolay olmadığı gibi, bu ürünü tasarlayabilmek için işletmelerin kaliteli ürün ve maliyeti ucuz olacak farklı üretim yöntemlerine ihtiyaçları vardır. Bu yüzden günümüz üretim dünyasında, müşterinin gelecekteki isteklerini önceden tahmin edip daha hızlı isteklerine uyum sağlayabilecek; esnek üretim yöntemleri ve programlamaları öne çıkmaktadır. Ürünün tasarımından pazarlamasına kadar olan üretim sürecinde başarılı olmak isteniyor ise doğru ve kaliteli ürün tasarımının bu süreçte en önemlisi olduğu bilinmelidir. Müşterinin istediği ürünün tasarım ve üretim sürecinde daha çok çeşit ürün tasarımı yapabilmek için ürün tasarım zamanının en aza indirilmesi bir ön şart durumuna gelmiştir.

Günümüzde ürün tasarımları gelişen teknolojiden etkilenerek bilgisayar programları ile sanal ortamda yapılmaktadır. Tasarımı kolaylaştıran bu süreçteki en büyük kolaylık ürünün bilgisayar ortamında üç boyutlu (3B) modellemesinin yapılmasıdır. Ürün tasarımının üç boyutlu modellemesi yapılırken tasarımcıyı, kullanılan programın kullanışlılığı, programın ürün mühendislik teknik hesaplamalarını yapabilmesi, tasarlanan ürünün sunum görselliliği ve daha iyi olan 3B katı model tasarlama programlarına yönlendirmektedir [1].

Üreticinin bir parçayı uzun zamandır üretmemesi ve tekrar üretmek istemesi, orijinal tasarımın yetersiz dokümantasyona sahip olması, bir ürünün orijinal üreticisinin artık bulunmaması fakat müşterilerin bu ürüne ihtiyacının olması, ürünün orijinal dokümantasyonunun kaybolması veya hiç var olmamış olması, ürünün bazı kötü özelliklerinin yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulması, ürünün uzun süreli kullanımına dayanarak ürüne ait iyi özelliklerin ölçülendirilmesi, rakip ürünün iyi ve kötü özelliklerinin analiz edilmesi, ürünün performansını ve özelliklerini geliştirmede sonuca götürecek yeni yolların keşfedilmesi, rakip ürünlerin anlaşılması ve daha iyi ürünlerin geliştirilmesinde rekabete dayalı karşılaştırma yöntemlerinin elde edilmesi, orijinal bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinin değişikliklere ya da güncel üretim yöntemleri için yeterli olmaması, orijinal üretici firmasının parça sağlamada aşırı ücret talep etmesi, modası geçmiş parçaların ya da eski üretim işlemlerinin bugünkü ve daha ucuz teknolojilerle güncellenmesi gibi istek ve sorunlara geriye dönük mühendislik çözüm gerektirmektedir. Bu proseslerin çözüme kavuşturulması aşamasında bir teknolojik kolaylık olarak sayısallaştırma sistemleri kullanılmaktadır. Parça bu sistemler vasıtası ile sayısallaştırılmakta ve CAD modeli oluşturulmaya hazır hale getirilebilmektedir [2, 3, 4].

Daha önceden tasarlanmış bir ürünün veya nesnenin tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda, nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla, ürünün 3B uzayda sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesi gerekir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) daha popüler hale geldikçe, tersine mühendislik (TM), 3B bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli üretim (CAM), bilgisayar destekli mühendislik (CAE) ve diğer yazılımlarında kullanılması, var olan parçaların 3B sanal modellerinin oluşturulmasında kullanılabilir bir metot haline gelmiştir [3].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRILMASI

Gökhan Berbercuma, 3B tarayıcılar ile koordinat ölçüm makineleri (CMM) arasındaki farkları belirtilerek, inceleme örneği olan türbin çarkını, 3B optik tarayıcıda tarayıp ve tersine mühendislik prosesi ile nokta bulutu formatında oluşan veriyi Unigraphics NX programı kullanarak 3B CAD formatına çevirmiştir [2].

Sedat ve Orhan, Bilgisayarlı Tomografi (CT), Manyetik Rezonans Görüntü (MR) kesitleri ve dijital görüntüler kullanılarak, insan vücudunun 3B modellerinin oluşturulması ve bu modellerle tümör gibi oluşumların konumlarının yüksek doğrulukta belirlenmesini sağlanmışlardır. Çalışmalarında, hastanın kafasının CT, MR görüntüleri ve dijital fotoğrafları çekilmiş, Bu görüntülerle hastanın hem beyninin hem de dış yüzünün 3B hacim ve yüzey modelleri oluşturulmuş, oluşturulan modeller kontrol noktaları yardımıyla nesne koordinat sistemine dönüştürmüşlerdir. Daha sonra tümör dokuları belirlenmiş ve tümörün konumu hesaplamışlardır. Ayrıca bu işlemleri gerçekleştirmek için bir medikal görüntüleme ve fotogrametri yazılımı geliştirilmişlerdir [5].

Ünal Uslu, Bilgisayarlı Tomografi (CT) cihazında taranarak, karmaşık iç ve dış yapıya sahip parçaların, 3B (3 boyutlu) modelinin ortaya çıkarılması böylece konvansiyonel ölçme cihazlarıyla yapılamayan boyutsal ölçüm ve katı modellemelerin ne kadar yüksek bir doğrulukla elde edilebileceği konusu araştırılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek için; radyoloji, sayısal görüntü işleme, bilgisayar destekli tasarım ve tersine mühendislik teknikleri bir araya getirilmiştir. 3B numunenin yüzey datalarını ortaya çıkarabilmek amacıyla; önce parça tomografide taranarak, kesit görüntüleri elde edilmiştir. Tomografi görüntüler üzerinde, MATLAB mühendislik yazılımı yardımıyla çeşitli görüntü analizi yöntemleri uygulanmış ve Pascal dilinde yazılan bir program aracılığıyla da 2 boyutlu konturların vektör geometrisi çıkarılmıştır. Daha sonra bu veriler MASTERCAM tasarım yazılımına gönderilerek nesnenin birebir modelinin elde edilmesine çalışılmıştır. MIMICS tersine mühendislik yazılımında analiz edilerek ve koordinat ölçme tezgahında yapılan taramalarla karşılaştırılarak, bahsi geçen metot ile CT yardımıyla modelleme yapmanın avantajlı ve dezavantajlı yönleri irdelenmiştir [6].

Paulic ve arkadaşları otomotiv uygulamalarından birinci çalışmalarında sac kesme kalıbını yeniden üretmeye kadar olan süreçlerini, 3B tarama tekniği kullanarak incelemiştir. İkinci çalışma ise taranan nokta bulutları verilerini inceleme amacıyla 3B CAD verileri ile karşılaştırmışlardır [7].

Hofmann ve arkadaşları iki boyutlu Bilgisayarlı Tomografi çekilerek elde edilen görüntüden, yüksek hassasiyetli nokta bulutunun hesaplamasında çözünürlüğe uyarlamalı bir sistem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemle tarama sonrasında alınan sonuçlarda, nokta bulutundan alınan ölçümün, taranan parçanın gerçek boyutlarına, çözünürlüğe dayalı olarak pikselden daha küçük (piksel altı) bir sapmayla, çok yakın sonuçlar verdiğini kanıtlamışlardır[8].

İbrahim ve arkadaşları uyluk kemiğinin CAD tabanlı katı modele dönüştürülmesi için yaygın olarak kullanılan dört farklı yöntemin tasarım ve analiz açısından avantajları ve dezavantajlarını karşılaştırmışlardır. Karmaşık modelin analizinde sonuçlara daha hızlı ulaşmak istendiğinde tersine mühendislik programının, fakat birebir modelin elde edilip daha kesin sonuçlara ulaşmak istendiğinde tasarım programının seçilmesi daha uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır [9].

Özgür ve arkadaşları bilgisayar destekli organ mühendisliğine örnek olarak tibia kemik dokusunun 3B model formatının oluşturulması ve farklı vücut kitle indeksine sahip erkek cinsiyetindeki insanların ayakta duruş pozisyonuna göre tibia kemiğinde oluşan dayanımı ölçmüşlerdir. Canlı dokusunun 3B modelinin çıkarılmasında bir yaklaşım yöntemi olarak görülmektedir [10].

Gürcan Samtaş, görüntüler üzerinde kullanıcı tarafından işaretlenen referans noktaları ile beraber görüntüyü analiz ederek işleyen ve işlenen görüntülerdeki hedef objelerin nokta bulutlarını görüntü işleme tekniklerini etkin bir şekilde kullanarak elde eden bir sistem geliştirmiştir. Geliştirilen sistem ile basit ve karmaşık yapıdaki birçok parçanın görüntülerinden nokta bulutları elde edilebilmektedir. Yapılan bu çalışmada geliştirilen sistem ile görüntülerden nokta bulutları elde edilmiş, nokta bulutları ile CAD modelleri oluşturulmuş ve modellerden imalat operasyonlarına yönelik bilgisayar kontrollü tezgah (CNC) kodları türetilerek tezgahta işlemeye hazır hale getirmiştir [11].

Derya elik, hızlı prototiplime yardımı ile cerrahi planlama ve özel implant tasarımı yaparak, ultrasondan gelen görüntüleri hızlı prototipleme süreci ile üç boyutlu fiziksel hale getirme çalışması yapmıştır Lazer ile taranan kafatasının 3B modeli oluşturmuş, bu dijital modelden başlayarak, ideal bir simetriye göre kafatasından eksik parçası sanal ortamda yeniden düzenlemiştir [12].



3. TERSİNE MÜHENDİSLİK

3.1. Tersine Mühendisliğin Tanımı

Mühendislik; bir ürünün veya bir yapının tasarımını, üretimini ve sürekliliğini sağlayan süreçler bütünüdür. Mühendislikteki bu gibi süreçler, müşteri isteğine göre hâlihazırda elimizde bulunmayan ürünün soyut olarak tasarımı ile başlar. Ürün tasarımının yapılmasında, ürünün çizimleri, yüzeysel özellikleri ve model üretimi gibi teknik verilerden faydalanılarak ürün tasarımı oluşturulmaya çalışılır. Bazı durumlarda bu süreçteki verilerden bir kısmı eksik olabilmektedir. Örneğin, üretilmek istenen ürünün son hali elde mevcut, yeniden üretim veya çoğaltma işlemi için gerekli olan ürünün teknik resmi veya bilgisayarda çizilmiş 3B CAD modeli bulunmayabilir. Bu gibi durumlarda, ürünün kendisinden hareketle üründen 3B CAD modele doğru süreci geriye doğru yürütme yapılarak ürünün başlangıç aşamasındaki üç boyutlu (CAD) verileri elde edilebilir [13, 14].

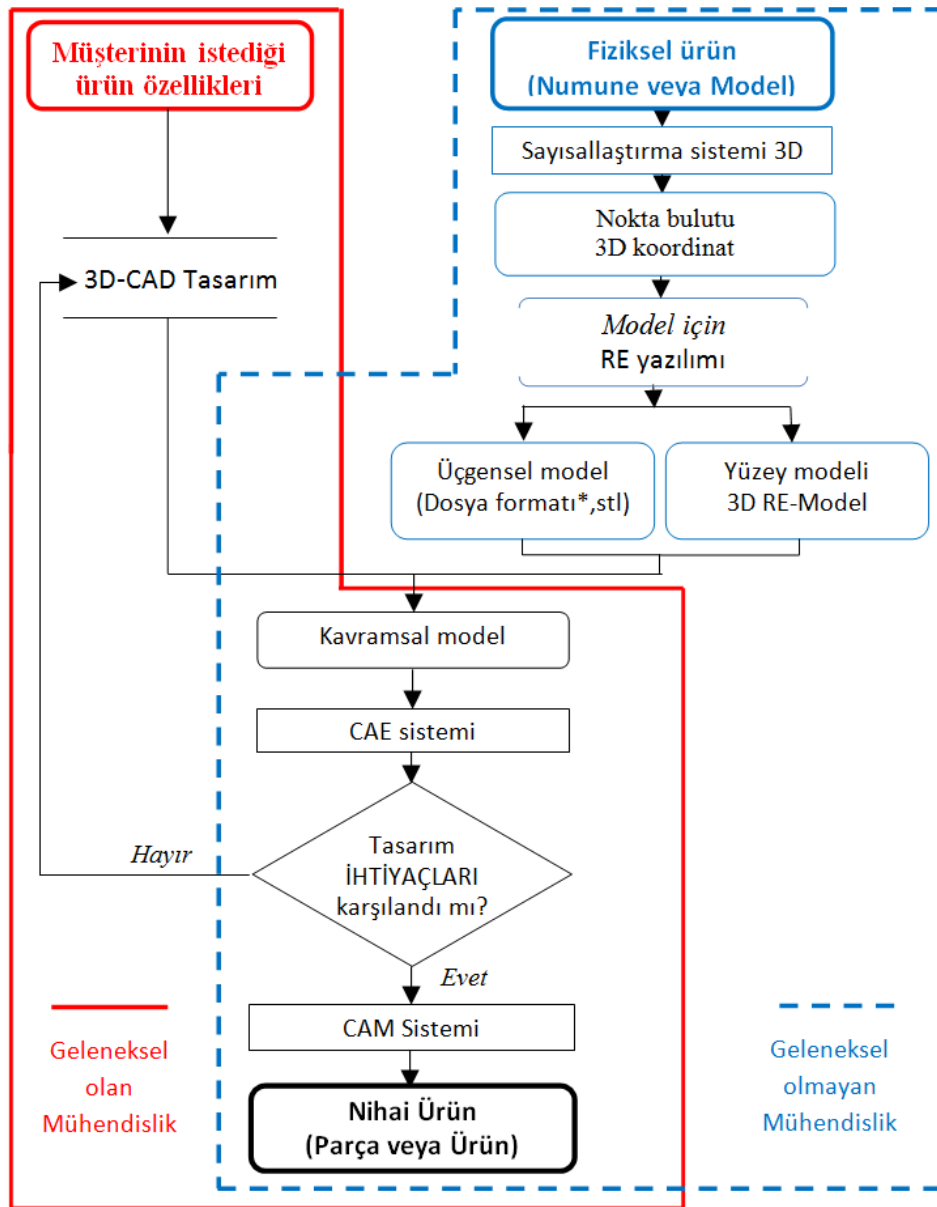
Tersine Mühendislik, var olan bir nesnenin tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda, nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla, ürünün üç boyutlu uzayda sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesidir. Tersine Mühendislik, bir makineyi veya nesneyi kopyalamak, geliştirmek, çalışma prensibini belirlemek ve parçalara ayırmak olarak da tarif edilmektedir [2, 3].

3.2. Tersine Mühendislikte Amaç

Ürüne ait hiçbir CAD model yok iken, bir nesnenin gelecek çalışmalarda kullanılmak üzere başarılı bir şekilde 3B CAD modeli oluşturulur. Sınırlı veriler kullanılarak doğru 3B modeller oluşturma sürecinin birkaç aşama ve adımı vardır. Şekil 3.1’de listelenmiş olan bu adımlar, verilerin sıralı olarak elde edilmesi, taşınması ve oluşturulması anlatılmaktadır. Bu akış çizelgesi tersine mühendisliğin temel prensibi olarak kabul edilebilir. Modelden ürüne gidiş mühendislik yaklaşımı, üründen modele gidiş süreci de tersine mühendislik yaklaşımı olarak tanımlanabilir [13, 15].

3.3. Tersine Mühendislikte Süreç

Geleneksel anlamda mühendislik; ihtiyaç olunan ürün elde yok iken bilim, tecrübe, karar ve ortak fikirleri kullanarak ihtiyaç olunan ürünün tasarımının yapıldığı, tasarlanan ürünün üretim aşamalarının planlandıktan sonra üretilerek ürüne ulaşıldığı süreçler bütünüdür. Ancak ihtiyaç olunan ürün elimizde mevcut olup ürünün tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda bu ürünü üretmek için bilgisayar ortamında tasarım bilgilerinin elde edilerek, üretimine geçilen süreçler bütününe günümüzde geleneksel olmayan anlamda mühendislik olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.1) [4, 14].



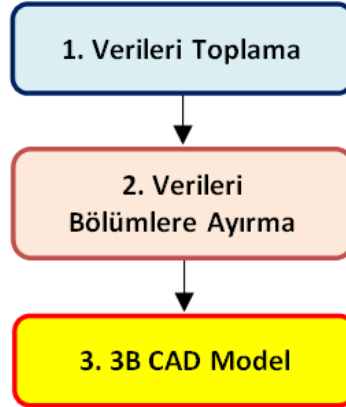
Şekil 3.1. Mühendislik ürünlerinin üretim süreci [16].

3.4. Tersine Mühendisliğin Günümüz Endüstrisinde Kullanım Sebepleri

- CAD yazılımlarında tasarlanması imkansız olan karışık geometriye sahip ürünlerin üretilmesi için 3B modelleri oluşturma ihtiyacı
- CAD yazılımlarında modellemesi zor olan serbest hat ve geometrilerin kolay ve kısa zamanda oluşturulabilmesi.
- Özellikle medikal sektöründe üretilen protezlerin gelişen teknoloji ile birlikte artık kişiye özel olarak tasarlanıp, kişiye özel olarak üretilmiş olması istenmesi.
- Orijinal nesnenin CAD modeli ile modele göre hazırlanacak olan kalıp ile üretilcek ürün arasındaki uyumsuzlukları ortadan kaldırmak.
- Üretilen ürünün mühendislik analizlerini yaparak kalite ve analiz performansı yükselterek daha hassas üretimini sağlamak.
- Ürün tasarımında daha ergonomik tasarım, retro tasarım, aerodinamik gibi alanlarda yenilikleri hızlandırmak [3].
- Orijinal ürün tasarımının yeterli dokümantasyona sahip olmaması durumu.
- Uzun süre önce üretmiş olduğu bir ürünü üreticinin yeniden üretmek istemesi.
- Daha önce üretilmiş olan bir ürünün üretim dokümanlarının kaybolmuş olması.
- Ürünün hatalı tasarımından dolayı yeniden tasarlama ihtiyacının olması.
- Ürünün uzun süreli kullanıma dayanıklı çıkması nedeniyle aynı üründen yeni üretim yaparken ürüne ait iyi ve eksik özelliklerin güçlendirilmesini sağlamak.
- Rakip firma ürünlerinin teknik özelliklerinin ve kalite analizlerinin yapılarak kendi ürünlerimizle iyi ve kötü yönlerinin karşılaştırmasının yapılabilmesi.
- Ürünün performansını ve kullanım özelliklerini geliştirmek için yeni üretim ve tasarım yolların keşfedilmesi.
- Rakip firma ürünlerin anlaşılması ve daha iyi ürünlerin geliştirilmesinde rekabete dayalı olan yeni kıyaslama metodlarının bulunması.
- Orijinal bilgisayar destekli tasarım modelinin değişikliklere veya güncel üretim yöntemleri için yetersiz olması durumu.
- Orijinal ürün üreticisi firmanın yedek parça temininde yetersiz veya isteksiz olması.
- Orijinal üretici firmanın yedek parça sağlamada yüksek ücret talep etmesi.
- Modası geçmiş parçaların ya da eski üretim işlemlerinin bugünkü ve daha ucuz teknolojilerle güncellenmesi [2, 3, 4, 14].

3.5. Tersine Mühendislikte İşlem Basamakları

Tersine mühendislikte üründen 3B CAD model oluşturma sürecini temel işlem akış diyagramı Şekil 3.2'deki gibidir.



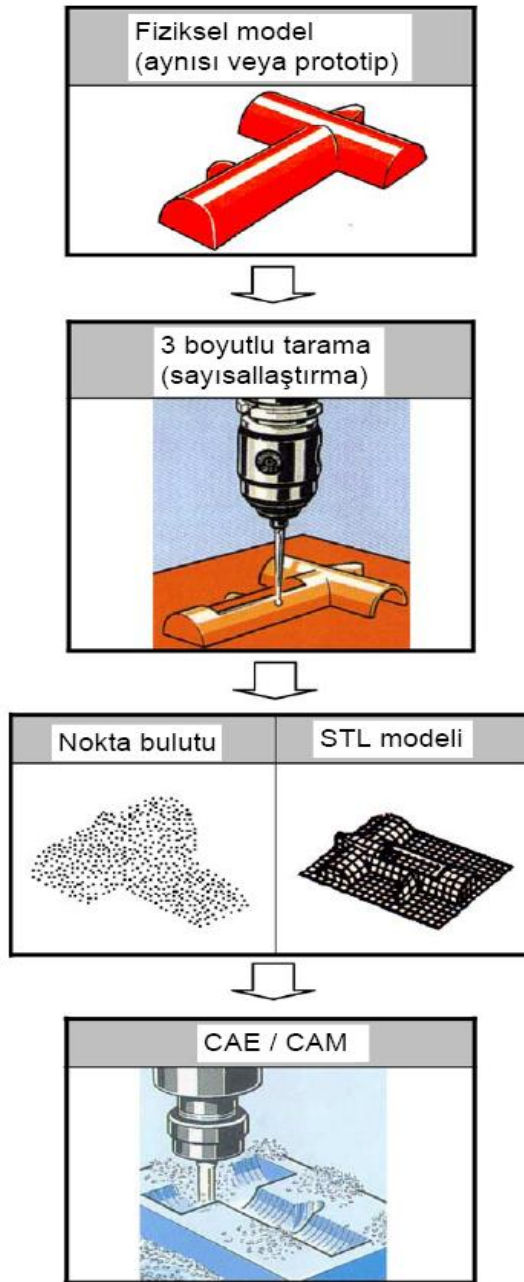
Şekil 3.2. Tersine mühendislik temel işlem akış diyagramı [15].

Ürün tasarımı ile başlayan geleneksel mühendislik sürecinin aksine, tersine mühendislik sürecinde ürün tasarımına, gerçekte var olan bir modelin şekil bilgisinin elde edilmesi ile başlanılır [2, 14, 17].

Tersine mühendislikte, bir ürünün 3B CAD modelini oluşturmak için aşağıdaki işlem sırası takip edilir [14];

1. Ürünün modeli belirlenir.
2. Ürünün geometrik verileri uygun tarayıcılarla taranarak alınır.
3. Nokta işleme programına bilgiler çağrılır.
4. Oluşan nokta bulutları için kesme düzlemleri alınır.
5. Objenin kesitleri ardışık dizi ile tespit edilir.
6. Farklı nesne kesitleri ardışık ilişki, yerine tutabilecek unsur tespit edilir.
7. Nokta bulutlarının yeni biçim birimi oluşturulur.
8. Ürünün yüzeyleri yapılır.
9. Yüzeyin doğruluğu ölçülür.
10. 3B model yapılır.
11. İstenirse hızlı prototipleme makinesiyle, ürün oluşturulur [14].

Tersine mühendislik sürecinin ilk gayesi fiziksel bir modelden kavramsal bir model oluşturmaktır. Bir numune ürün veya prototip, bu bağlamda model rekonstrüksiyonu için özel bir yazılım ile desteklenen 3B taraması yapılarak ürünün geometrik bilgi verilerinin çıkartılması gereklidir. Tersine Mühendisliği proses sırası genel olarak tarama sisteminden üç boyutlu sayısallaştırıcı yazılım desteğiyle ürünün nokta bulutu formatında geometrik verilerini çıkartıp, geometri verilerinden STL ve 3B CAD modelinin oluşturularak ürünün isteğe göre hızlı prototiplemesinin yapılmasıdır (Şekil 3.3).

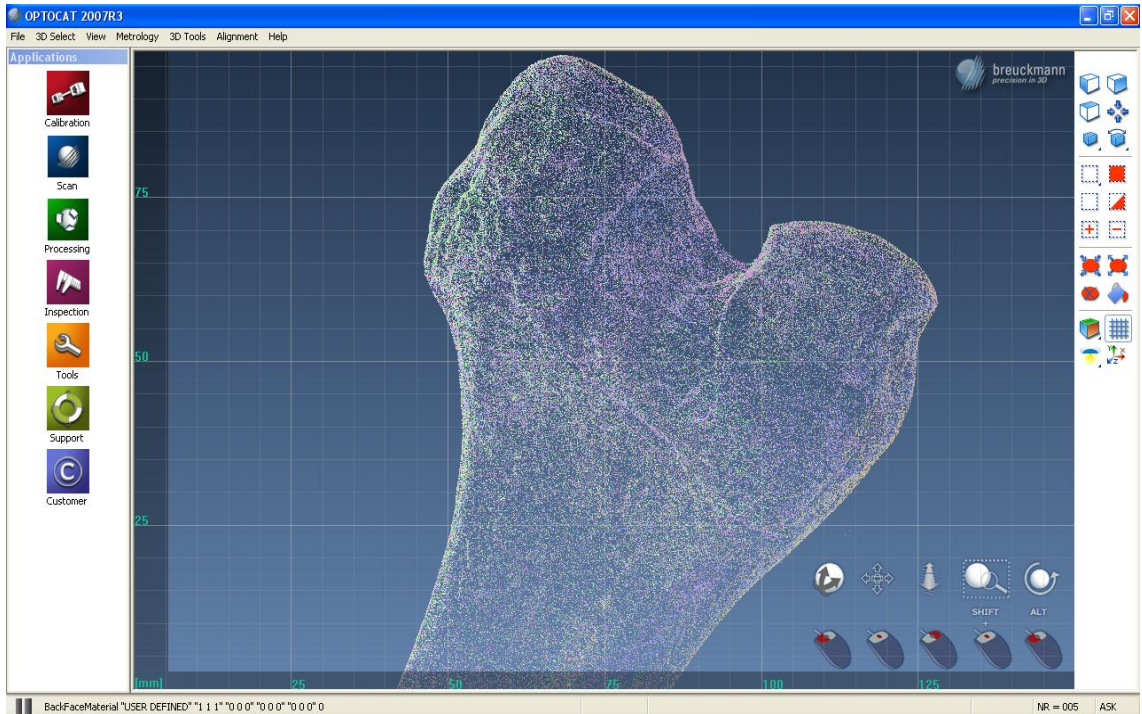


Şekil 3.3.Tersine mühendislik prosesi işlem basamakları [15, 16, 18].

4. TERSİNE MÜHENDİSLİKTE VERİ TOPLAMA VE YÖNTEMLERİ

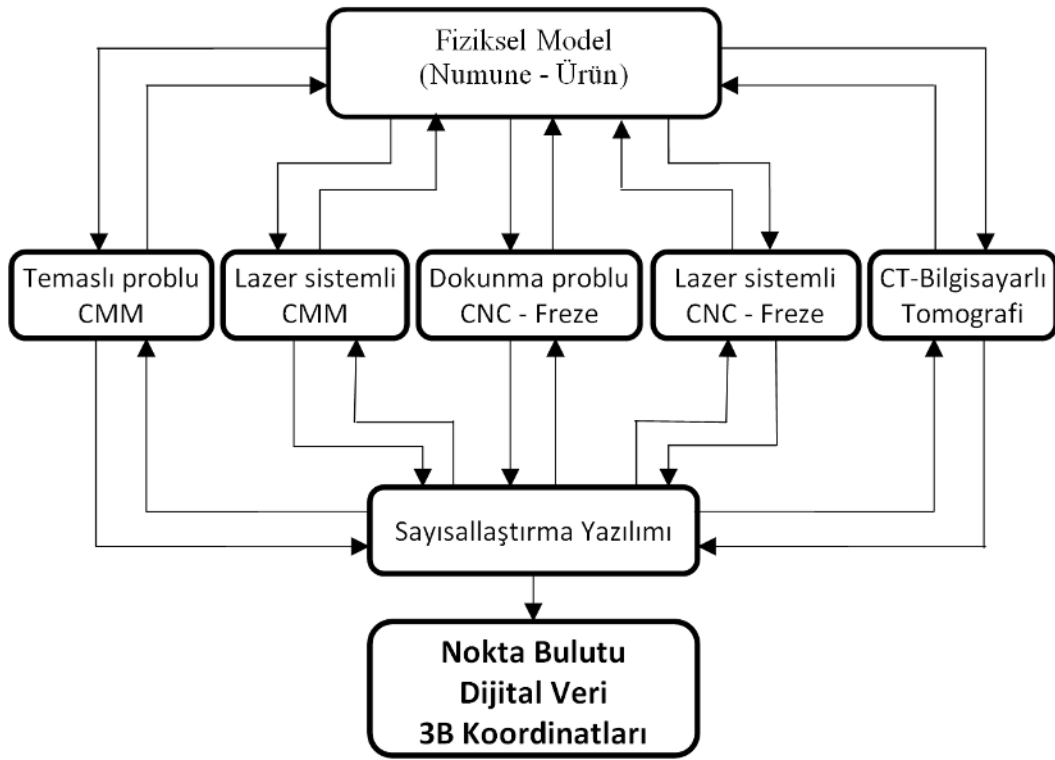
Tersine mühendisliğin proseslerinden veri toplama serbest ve karmaşık yüzeylere sahip olan gerçek parçaların geometrik bilgisinin elde edilmesi tersine mühendisliğin en önemli özelliklerindendir. Ürün model veri toplama işlemi, ürün yüzeylerinden geometrik yüzey verilerini alırken ancak ürünün fiziksel sınırlarından ibarettir. Bu nedenle ürünün geometrik ölçümünün tam olarak yapılabilmesi için birden fazla görüntü alıp bu görüntüleri birbiri ile eşleştirerek doğru geometrinin bulunabilmesi sağlanır. Yeniden yapılandırılacak parça modelinin kalitesi, başlangıç modelinin üzerine ölçülen noktaların sayısına, ölçüm tipine ve ölçüm tekniğine bağlı olarak değişmektedir [2, 14, 17].

Tersine mühendislikte veri toplama prosesi ürünün tanımlanmamış olan modelinden 3B tarama yaparak ürünün tanımlanmış olan 3B CAD yüzey model verisi oluşturulmasıdır. Oluşturulan 3B CAD model yüzey verisi önce Şekil 4.1'de olduğu gibi nokta bulutu şeklindedir. Modelin 3B yüzey modelinin tarama işlemine sayısallaştırma denilebilir. Sayısallaştırma, 3B yüzey model tarama teknikleri ile bir ürüne ait nokta bulutu verilerini çıkarıp, 3B CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) ürün modelinin oluşturulmasına imkan verir.



Şekil 4.1. Sayısallaştırılmış 3B model femur kemiği nokta bulutu verisi (OPTOCAT programı)

Veri toplama işlemi, ürün geometrisindeki yüzey derinliklerinin z eksenli verilerini bulan lazer tarama, radar uygulaması, nokta detektörleri gibi yaklaşımlarla gerçekleştirilir. Veri toplama prosesinin tarama işlemi sırasında tanımlanmayan yüzey boyunca analog bir tarama başlığı ile (temaslı veya temassız) ileri geri kumanda edilir. Bu işlem sırasında sistemin sayısal veri formunda yüzey ile ilgili verileri algılayarak nokta bulutu şeklinde matris oluşturur. Bu yöntemler ile toplanan verilerin düzenlenip veri analizlerini yapıp model üretimine hazır hale getirilir. Şekil 4.2’de ise 3B geometri ve veriler için sayısallaştırma teknikleri şematik olarak gösterilmektedir [19].



Şekil 4.2. 3B Geometri ve oluşturulan veriler için sayısallaştırma teknikleri şeması [16].

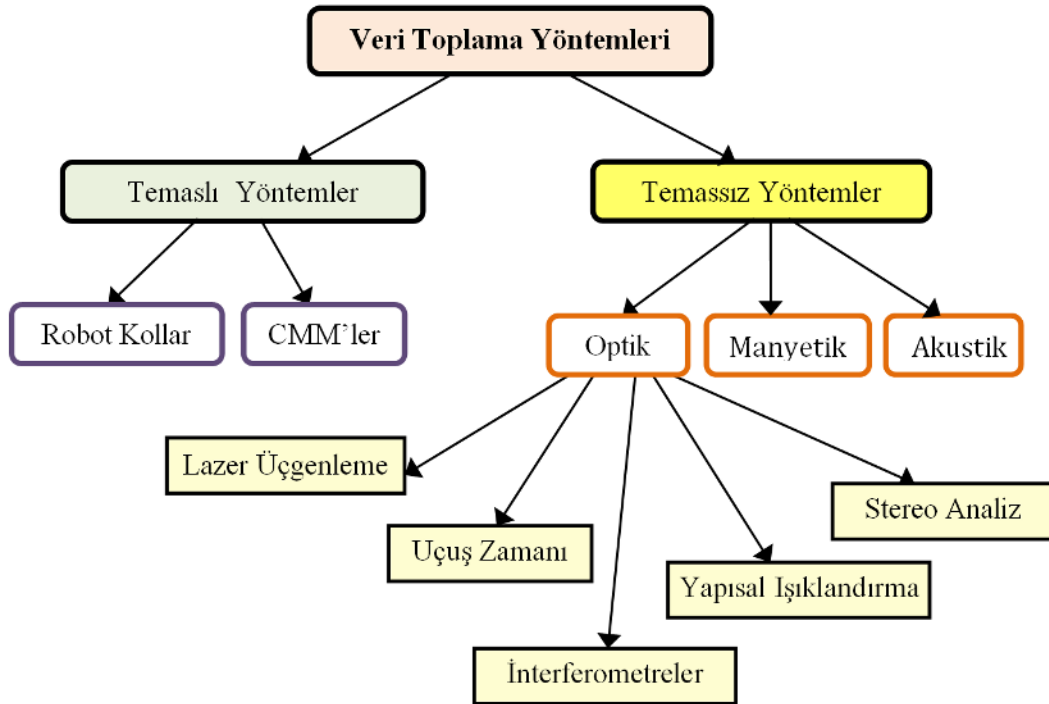
Temaslı ve temassız veri toplama sistemleri temelde aynı prensipte çalışırlar. Amaçlanan ürün geometrik verilerinden nokta bulutu halinde 3B yüzey verisini elde etmektir. Ürünün nokta bulutu verisi uygun bilgisayar yazılımları ile birlikte ürüne ait 3B yüzey verileri anlamlandırılarak ürünün Bilgisayar Destekli Tasarım ve Bilgisayar Destekli Üretim süreçlerinde kullanılabilecek uygun bir formata dönüştürürler. Nesnenin model verileri böylece bilgisayar üzerine aktarılarak yüzey veya katı model üzerinde istenilen değişiklik veya geliştirmeler yapılarak ürün üretimine geçilebilir.

Her veri toplama yönteminin kuvvetli ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu nedenle, veri toplama sistemi model ürün özellikleri göz önünde bulundurularak dikkatlice seçilmelidir. Temaslı ve temassız veri toplama yöntemlerinin tümünde, nesne yüzeylerinde yer alan nokta konumlarını belirlemeyebilecek uygun analizler yapılması gereklidir.

Bir model veri toplama işleminde sayısallaştırma yapılırken aşağıdaki faktörler göz önüne bulundurulmalıdır [2, 20];

- Modelden tarama yapılacak kısımlar neresidir?
- Ürünün fiziksel durumu nedir?
- Gerekli tarama armatürlerine olan ihtiyaç,
- Uygun sayısallaştırıcı mevcut mu?
- Sayısallaştırma işleminde oluşabilecek hatalar,
- Sonuç geometrinin kullanım gerekliliği gibi etkenler,

Tersine mühendislikte sayısallaştırma işleminde kullanılan tarama cihazları temaslı ve temassız olarak iki ana grupta toplamak mümkündür (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Tersine mühendislikte kullanılan veri toplama yöntemleri [15].

4.1. Temaslı Veri Toplama Yöntemleri

Temaslı veri toplama yöntemi mevcut yöntemler içerisinde en popüler olarak kullanılanıdır. Temaslı veya dokunmalı sistemlere problu sistemlerde denilebilir. Mekanik (robotik) kollar, dokunmatik sensörlü cihazlar ve koordinat ölçüm makinelerinden (CMM) oluşmaktadır.

4.1.1. Mekanik (Robotik) Kollar

Üç veya daha fazla eksenli mekanik cihazın kolunun ucuna takılı olan bir ölçüm probu ile model üzerinden koordinatları istenen noktaya temas ettirilerek noktanın o andaki koordinatları hassas olarak ölçülür. Bu sistemde modelin yüzey form bilgisindense model üzerinde istenen sayıda nokta koordinat verileri elde edilebilmektedir. Ölçüm kolu yani probun ucunda elmas sertliğinde bir küre bulunmaktadır. Bu küre modelin yüzeyinde, koordinatı belirlenmesi istenen noktaya değdirildiğinde, koordinat belirleyici ölçüm sistemi ile modelin geometrik ve yüzeysel koordinatları olan x , y , z değerleri üç boyutlu uzayda elde edilerek cihazın bağlı olduğu bilgisayara aktarılır. Böylece o noktanın koordinat verisi bulunmuş olur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Mekanik (robotik) kollar [21].

4.1.2. Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM)

Çoğunlukla yüksek hassasiyet istenen ürünlerde kullanılırlar. Üç boyutlu koordinat ölçüm makineleri (CMM) en hassas ölçüm cihazlarıdır (Şekil 4.5). Bu cihazlar NC programlanabilen makineler ile modelin ölçüm yapılacak yüzeyi üzerinden belli bir yolu takip ederek çok hassas veriler toplayacak şekilde ürünün önceden belirlenmiş yüzey geometrisi örnekleme yapılarak programlama yapılabilirler. Örnekleme ilkesi, CMM kullanarak bir modelin ölçülüp kontrol edilebilmesinin tek yoludur. Ölçümü yapılacak olan model yüzeyinden çok sayıda nokta verisi alınabilmesi için yüksek kalitede bir kontrol cihazı gerekir. Bu gerekliliğin yanı sıra model yüzey geometrisinin düzgün olması da önemlidir.

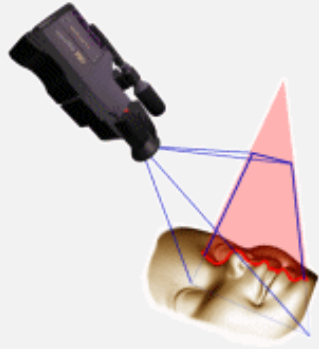
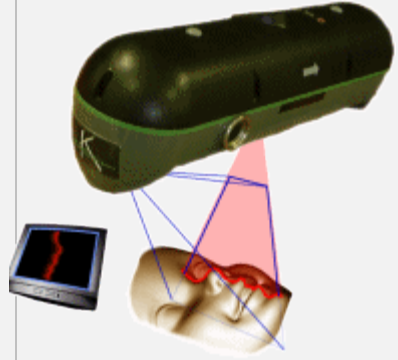
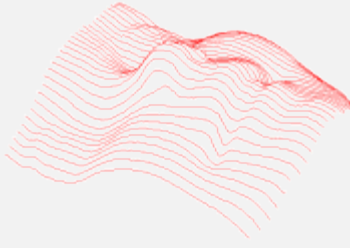
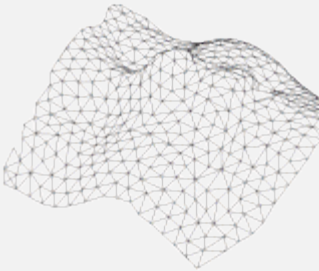
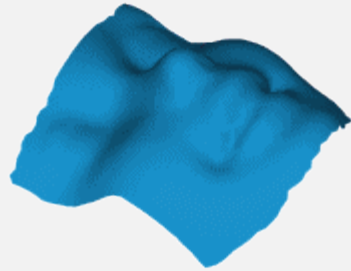


Şekil 4.5. Koordinat ölçüm makineleri (CMM) [22].

Mekanik (robotik) kolların ve CMM makinelerin model oluşturulacak parça yüzeylerine temas ederek çalıştıkları için modelin yüzeyinde izler oluşturarak modele zarar verebilecek olmalarıdır. Eğer ölçüm yapılacak modelin yüzeyi yumuşak ise bu yöntemler modelin yüzeyinde küçük delikler oluşmasına sebep olabilirler. Modelin esnekliği, temaslı alıcılarla nesne yüzeylerine dokunmaları esnasında ölçüm hassasiyetini kötü etkileyebileceği gibi çentik oluşumuna da neden olabilirler. Modelin geometrik yapısı karmaşık bir yapıda ise hassas ölçüm yapabilmek için modelden alınacak nokta sayısı arttığından nokta verilerinin elde edilebilmesi bazen günler hatta haftalar alabilmektedir.

4.2. Temassız Veri Toplama Yöntemleri

Temassız veri toplama yöntemleri modelin geometrisini üç boyutlu ortamda oluşturabilmek için model üzerine temas etmeden belirli bir mesafe aralıkta ışık, ses ve manyetik alandan faydalanılarak yapılır. Model ürüne temas etmeden yüzey geometrisini algılayan sistemlerdir (Şekil 4.6). Veri toplama işlemi sırasında her seferinde işleminin durdurulup model ürün konumlamasının değişmesi gerektiğinden ihmal edilemeyecek bir zaman kaybına sebep olmasına rağmen fiyat bakımından temassız veri toplama algılayıcıların temaslı veri toplama algılayıcılarına göre oldukça ucuzdur [13].

		
Kaynak Model	Temassız tarama yapılarak lazer parçanın üzerinde kırmızı bir çizgi çiziyor.	Tarama verileri gerçek zamanlı olarak programlar ile sayısallaştırılıyor.
		
Sonuçta ortaya çıkan veriler 3B nokta kümesidir.	Sonuç iyi tanımlanmış noktalardır.	Son olarak, yüzeyden toplanan veriler bir 3B model sunar.

Şekil 4.6. Temassız tarama yöntemi ile veri elde etme işlemi [23].

4.2.1. Optik Yöntemler

Temassız optik yöntemlerle tarama yaparak veri toplama model ürünün yüzey geometrisi çok yüksek hassasiyetle elde edilerek daha hızlı veri toplama kapasitesine ve genelde düşük maliyete sahiptirler. Optik tarama sistemlerinde modelin üzerine bir lazer çizgisi düşürülmesi ve bu kesit çizgisinin modelin üzerinde farklı bakış açısına göre hareketiyle ölçülen her lazer kesitinin birbiriyle denkleştirilerek yüzey geometrisini çıkarma prensibiyle çalışır.

Modelin tarama yapılmak istenen bölgesine optik cihaz tarafından gönderilen lazer ışını, model yüzeyine çarpma, geri dönüş zamanına ve ışık hızını dikkate alarak hesaplar. Lazer ışınının model yüzeyine çarpıp cihaza tekrar geri dönmesi gerekliliğinden dolayı karmaşık yüzey, delik, kanal gibi geometrileri bulunduran modellerde lazer ışının geri dönmesi sıkıntılı olacağı için tercih edilmemektedir. Optik taramada veri toplanması lazer ışınının, kusursuz üçgen tekniği denilen bir yöntem ile ışının geri dönmesi sayesinde sağlanabilmektedir [24].

Optik sensör iki boyutlu çok çeşitli profillerde parçanın dışını tarar, benzeri nokta lazer sensörlerine karşılık, çizgi optik sistemi cismin dışına çizgi şeklinde lazer ışını göndererek ölçüm yapabilmektedir. Gönderilen lazer ışınları koordinatları kayıt altına alınabilmektedir. Uzaklık (z-ekseni) bilgisinin beraberinde, ayrıca denetleyici kamera görüntüsünden gelen lazer ışınlarının x eksenindeki gerçek pozisyonu hesaplanabilmektedir. Sonuçlar iki boyutlu koordinat sistemine aktarılır ve hareket eden tarama sensörü üç boyutlu olarak taranan parçanın çizimini çıkaracaktır. Program yardımıyla çıkarılan çizim ile orijinal görüntü karşılaştırılabilir. Bu yöntemle ekran üzerinden en ufak hatalar tespit edilebilir [25].

Bu yöntem ile orijinal BDT verisi ve bu veriye bağlı olarak imal edilmiş parçanın 3B sayısallaştırma verisinin karşılaştırılması hedeflenmektedir. Karşılaştırılmalarda kullanılan 3B CAD sistemler tarafından oluşturulan BDT yazılımları için yerel bir dosya formatıdır. Bu yöntemde çoklu ışık kesitleri, siyah ve beyaz renkte şeritler halinde desenler cismin yüzeyine düşürülerek ve bir ya da daha fazla yüksek çözünürlükteki kamera tarafından çekimleri yapılarak bilgisayar ortamında 3B yüzey geometri bilgisi elde edilir [26].

Taranan modeller endüstriyel parçalar olabileceği gibi artistik nesneler, insan ya da taşınmaz bir obje de olabilir. Tarama sisteminin yeteneklerine göre parmak izi bile taranabileceği gibi bir gemi gövdesi de taranabilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Tarama yapılan parmak izi verisi [27].

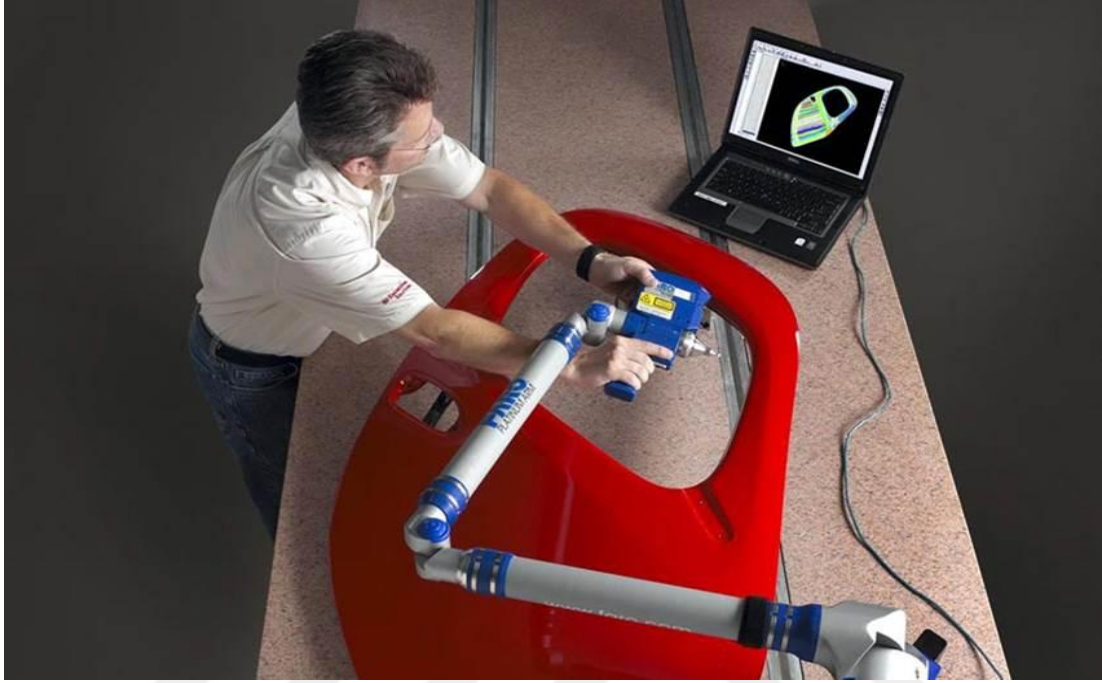
Optik tarama yöntemin en büyük avantajı taşınabilir 3B tarayıcılar ile nesne etrafında birden çok çekim yapılabilmesini mümkün olması ve böylece büyük ölçekli ve yerinden hareket ettirilemeyen nesne ya da ortamların taramalarının kayıpsız yapılabilmesine olanak sağlamasıdır.

Kalite kontrol alanında kullanılan yöntemlerden bir tanesi optik tarama yöntemidir. Bu tarama cihazları kolaylıkla kalite kontrol sistemlerine entegre edilebilir[25]. Kalite süreçlerini iyileştirmek isteyen birçok firma bu teknolojiye faydalananarak yüksek kalite ve yüksek müşteri memnuniyeti yakalamayı başarmışlardır.

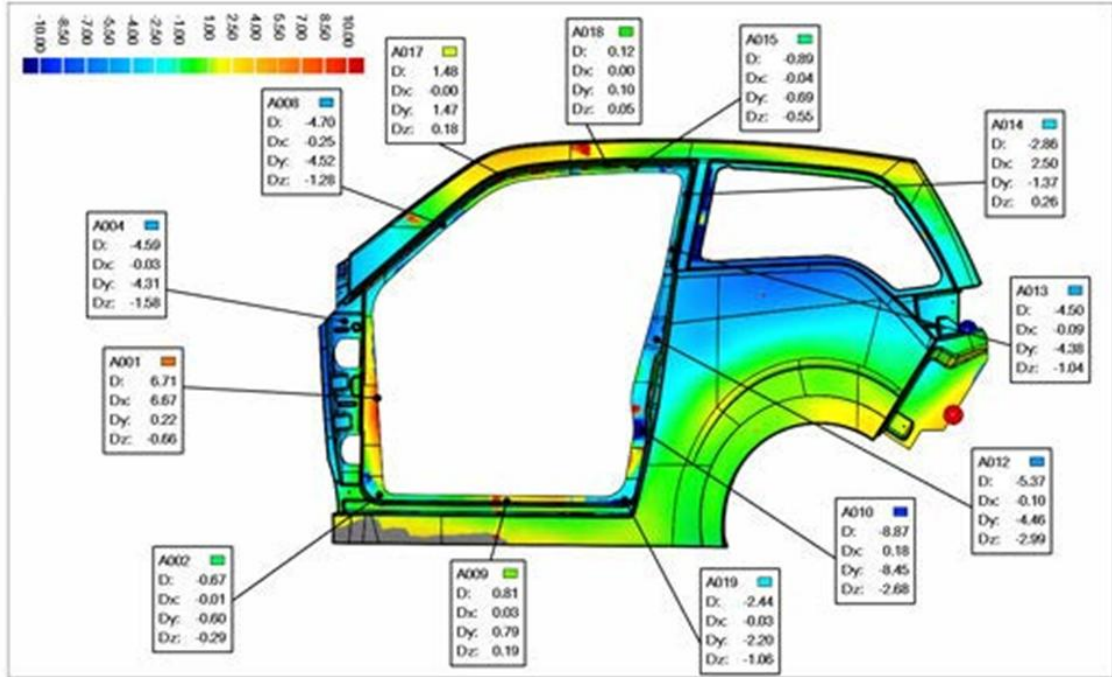
Kalite kontrol amaçlı yapılan tarama işlemlerinde (Şekil 4.8),

- Ürünün 3B datası mevcuttur ve ürün üretilmiştir.
- Üretilen ürünün doğru üretilip üretilmediği (özellikle ürün karmaşık geometriye sahipse) kontrol edilebilmek isteniyordur.
- Üretimi yapılan parça lazer tarama cihazı ile taranır, tarama verisi elde edilir.
- Elde edilen tarama verisi, parçanın 3B datası ile bilgisayarda karşılaştırılır.
- Karşılaştırma sonucunda parçaların form bozuklukları, kesim hattı hataları ve benzeri kalite hataları renk haritasında kontrol edilir.

Kalite kontrol amaçlı yapılan araç kapısı Şekil 4.8'deki gibi optik taraması sonrasında çıkan raporundaki renk haritasında görülen ölçü hataları istenilen toleranslar dışındaysa gerekli önlemler alınarak ürünün kalite kontrolü yapılmış olur (Şekil 4.9).



Şekil 4.8. Kalite kontrol için optik kaporta taraması [28].



Şekil 4.9. Lazer tarama ile kalite kontrol rapor örneği [29].

Özellikle karmaşık geometriye sahip ürünler için üretilecek kalıpların doğru üretilip üretilmediğinden emin olma açısından bu yöntem oldukça önemlidir ve olası tüm hataların ürün üretilmeden önüne geçilmesini sağlar (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Kalite kontrol için optik kaporta kalıp taraması [30].

Koordinat Ölçme Cihazlarının (CMM) yazılımının yetersiz olması, hızlı ve esnek programlamaya müsaade etmemesi ve özellikle 3B CAD model ile çalışma imkanı vermemesi, modernize edilme veya diğer bir adla retro fit yapılma ihtiyacını doğurmaktadır. Konstrüksiyon yapısı eskimemekle birlikte, zamanla yazılımların günümüz ihtiyaçlarına cevap verememesi, grafiksel raporlamaların sürekli değişiklik göstermesi, firmaların kalite kontrol rapor formatlarını istekleri doğrultusunda talep etmeleri, birçok koordinat ölçme cihazının 3B CAD model ile çalışma imkanı sağlamaması ve istenen raporlama özellikleri için alınacak olan, optik tarama sistemli cihazın ek bir maliyetinin olması, otomotiv sanayi başta olmak üzere birçok uygulama alanlarında CMM cihazlarının gelişen teknoloji ile birlikte optik tarama başlıkları takılması ve yazılımlarının yenilenmesi ile modernizasyon işleminin yapılması kaçınılmaz hale getirmektedir [31].

Optik tarama cihaz üzerinde bulunan bir ışık kaynağı projektör, çıkan ışınları model ürünün yüzeyine saçaklar halinde düşürerek oluşan görüntüyü yanında bulunan yüksek çözünürlüğe sahip dijital kameralar (CCD) yardımıyla çekerek sayılaştırma programının algoritmasına uygun olarak, ürünün yüzey geometrisini çok kısa bir zamanda çok sayıda noktanın X, Y, Z koordinatlarını tespit ederek nokta bulutu formatında gösterir. Böylece cismin yüzey formu bilgisini içeren nokta bulutu formatında oluşur ve 3B CAD modelleme işlemi mümkün olmaktadır [6].

Optik tarama cihazlarında ışık kaynağı projektör, genelde beyaz renkte olmakla beraber farklı renklerde ışık verebilmektedir. Beyaz ışığın kullanımında problem olmayan, ancak farklı renklerde projeksiyon yapan sistemlerde objenin rengi de önem kazanmaktadır. Karanlık ortamda beyaz ışıkla yapılan ölçüm sonuçlarında her renk obje, aynı kalitede taranmış olmasına rağmen, mavi ve yeşil ışıkla alınan ölçümlerde özellikle kırmızı kutu ile ilgili bir sorun yaşanmaktadır. Sorun, özellikle mavi ışıkta daha belirgindir. Yeşil ışıkla alınan tarama sonuçlarında yeşil renk, en iyi kaliteyi verirken, bunu takip eden sarı ve mavi renkte daha düşük kalitede tarama sonuçları gözlenmektedir. Aynı şekilde mavi ışıkla alınan ölçümlerde de mavi renk en iyi kaliteyi vermektedir (Şekil 4.11) [32].



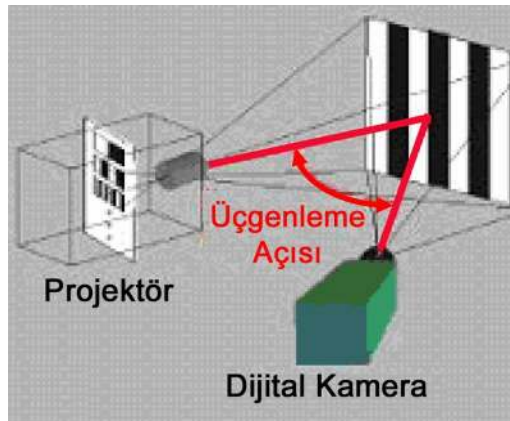
Şekil 4.11. Işık kaynağı projeksiyondan farklı renklerde saçaklar halinde yansımaları [32].

Ürünün model geometrisinin büyüklüğü ve yüzey durumuna göre farklı açılardan yüksek çözünürlüğe sahip dijital kameralar tarafından taraması yapılır. Dijital kameraların çözünürlüğü yükseldikçe, model ürün küçük ve karmaşık olsa bile, yüksek hassasiyette, daha kaliteli tarama verileri elde edilebilir. Temassız optik tarama sistemi cihaz tasarımlarının; tek kameralı, çift kameralı ve asimetric olan modelleri vardır (Şekil 4.12).



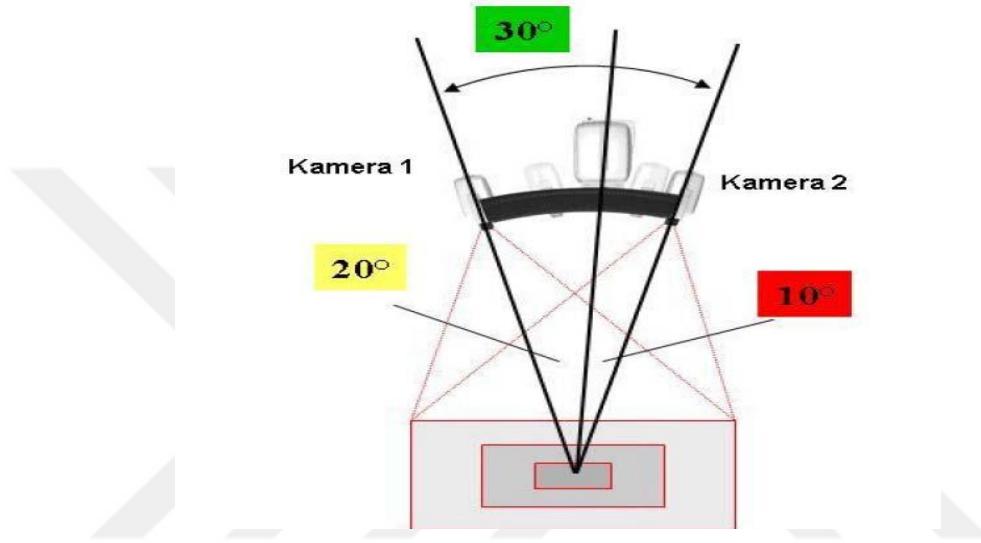
Şekil 4.12. Tek, çift ve asimetric kameralı optik tarama sistemleri (Smart SCAN) [33].

Tek kameralı optik tarama cihazlarında, bir adet ışık kaynağı projeksiyon ve bir adet dijital kamera kendi aralarında belli bir açığa göre konumlandırılmışlardır. Işık kaynağı projeksiyon ve kamera arasında oluşan açığa üçgenleme açısı denir (Şekil 4.13). Taranan modelin yüzey geometrisindeki nokta koordinatları üçgenleme açısına göre trigonometrik bağıntılarla, sayılaştırıcı program tarafından otomatik olarak hesaplanarak bulunur.



Şekil 4.13. Tek kameralı sistem üçgenleme açısı [6].

Çift kameralı optik tarama cihazlarında ise ortada bulunan ışık kaynağı projeksiyon ile her iki tarafında farklı açılarda iki adet dijital kamera konumlandırılmıştır. İki kamera da model ürünün ölçüm yapacak bölgesine odaklanmıştır. Buda asimetrik bir tasarım oluşturmuştur. Asimetrik tasarım ile kameralar arasında 10° , 20° ve 30° olacak şekilde üç tane üçgenleme açısı elde edilerek görüş alanının büyümesiyle daha kısa zamanda tarama ile detaylı olarak incelediği için kalitesi yüksek veri elde edilebilmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Asimetrik yerleştirilmiş çift kameralı sistem (Breuckmann STEREOSCAN)

Kompleks yüzeylerin, kısa sürede ve çok hassas olmayan ölçümleri gerektiğinde, geniş kullanım alanlarına sahip lazer tarayıcılar ve optik cihazlar CMM'lere iyi bir alternatif oluşturmaktadırlar [13].

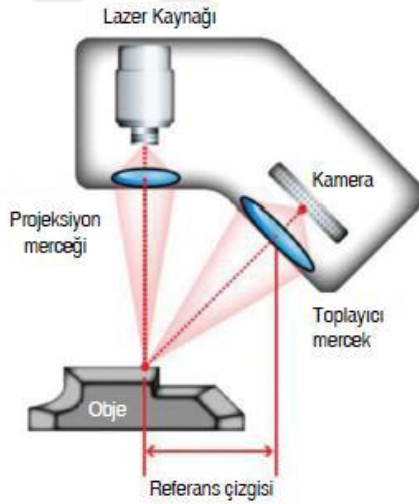
Bunlar 3B bir nesneyi saniyeler içinde algılayıp görüntü oluşturacak kadar hızlı ve CMM'lere oranla göz ardı edilemeyecek oranda ucuzdurlar. Bu sistemler CMM ile birleştirildiklerinde, hem yüksek hassasiyet, hem de hızlı veri aktarımını birlikte sunan ideal bir çözüm oluşturmaktadır. Sonuç olarak tüm ölçüm metotları, yüzey veya malzeme içi ölçümlerinde, ışık, ses, manyetizma ve fiziksel yüzey teması gibi olaylardan faydalanılarak yapılmaktadır [13].

Ölçüm hızını; kullanılan yöntemin oluşum hızı ve algılayıcının veri toplama hızı belirlemektedir. Kullanılan algılayıcı tipi aynı zamanda, ölçülen verilerin hesaplanması için gerekli analiz miktarını ve hassasiyetini belirler [13].

Optik yöntemler çalışma sistemine göre lazer üçgenleme, uçuş zamanı, interferometre, yapısal ışıklandırma ve stereo analizleri olarak beş kategoride incelenebilir.

4.2.1.1. Lazer Üçgenleme;

Model taramayı yapmak için lazer ışığı kullanan tarayıcılardır. Lazer ışını noktası model üzerindeki konumunu bulmak için bir kameradan yararlanır. Lazerin model yüzüne ne kadar uzak olduğuna bağlı olarak, lazer noktası kameranın görüş alanındaki konumu belirler. Lazer nokta, kamera doğrultusu ve lazer ışın doğrultusu bir üçgenleme oluşturur. Üçgenin bir tarafının uzunluğu, kamera ile lazer yayıcı arasındaki mesafe ve lazer ışını ile kamera doğrultusu arasındaki açıyı otomatik olarak sayılaştırıcı program hesaplar. Kamera köşesinin açısı, kameranın görüş alanındaki lazer noktasının konumuna bakarak belirlenebilir. Bu üç bilgi parçasına göre üçgenin şeklini ve boyutunu tam olarak belirler ve lazer ışının model üzerindeki nokta koordinatını verir (Şekil 4.15). Veri toplama sürecini hızlandırmak için tek bir lazer nokta yerine bir lazer şerit kullanılarak model ürünün üstünden geçirilir [34]. Tozlu ve karanlık ortamlarda kullanılabilir olduğundan optik tarama sistemlerinde ışık kaynağı yerine lazer ışını daha çok tercih edilir [25].



Şekil 4.15. Lazer ışın yansıması ile oluşan lazer üçgenleme açısı [35].

Ölçüm yapan ve lazer ışını gönderen tarama başlığı, tarama yapılacak modele yaklaşık 50-100 cm uzaklıkta tutularak lazer ışınlarının modelin yüzeyinden çarpması ile tarama başlığında bulunan kamera tarafından kaydedilir. Modelin tam olarak sayısallaştırılması her yönüyle taraması sonucu oluşur ve bazen birden fazla kamerada kullanılabilir.

4.2.1.2. Uçuş Zamanı;

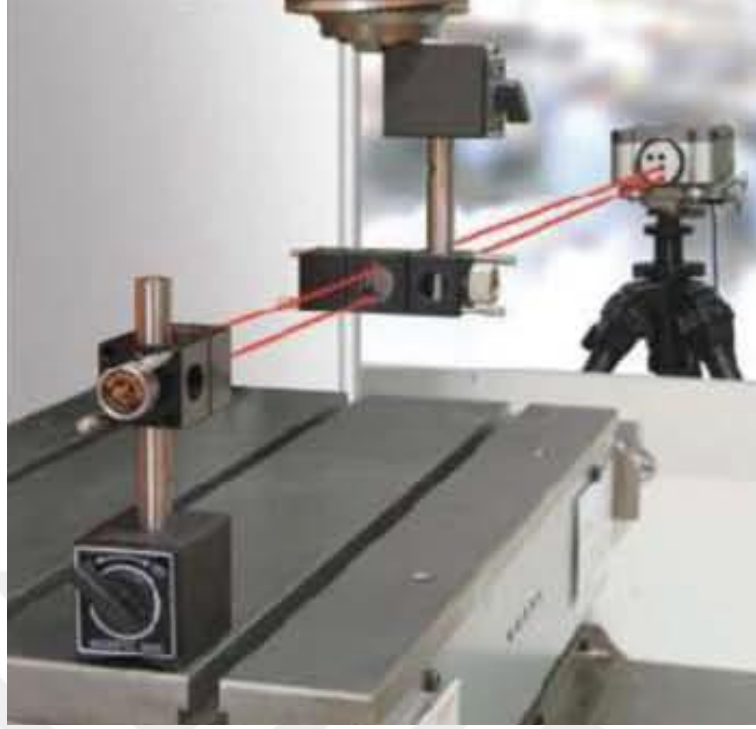
Lazer ışının, model yüzeyine gidiş geliş süresine göre lazer kaynak ile model yüzeyi arasındaki mesafesi bulunur. Lazer ışın gidiş dönüş zamanına göre hızı bilindiğinden, gidiş-dönüş süresi, tarayıcı ile yüzey arasındaki mesafenin iki katı olan ışının model ürünün yüzeyine olan mesafesi belirlenir. Lazer ışını, sadece bir noktanın görüş yönündeki mesafesini tespit eder. Model ürünün farklı noktalarının taranması gerekliliğinden dolayı görüş açısını değiştirerek, tüm görüş alanını taranmaya çalışılır. Lazer ışının yansıma noktası, lazerin bağlı olduğu başlığının döndürülmesiyle veya bir döner tabla sistemi kullanılarak değiştirilebilir. Döner tabla dönüşü otomatik olarak zamanı programlanabilir. Tabla daha hızlı ve daha doğru bir şekilde döndürülerek tarama yapılabilir. Tipik uçuş zamanı 3B lazer tarayıcıları saniyede 10.000 -100.000 nokta arasındaki mesafeyi ölçebilir. Bu sistem bir uçuş zamanı kamerası olarak anılır (Şekil 4.16) [34].



Şekil 4.16. Uçuş zamanına göre tarama yapan döner tablalı cihaz (EinScan) [36].

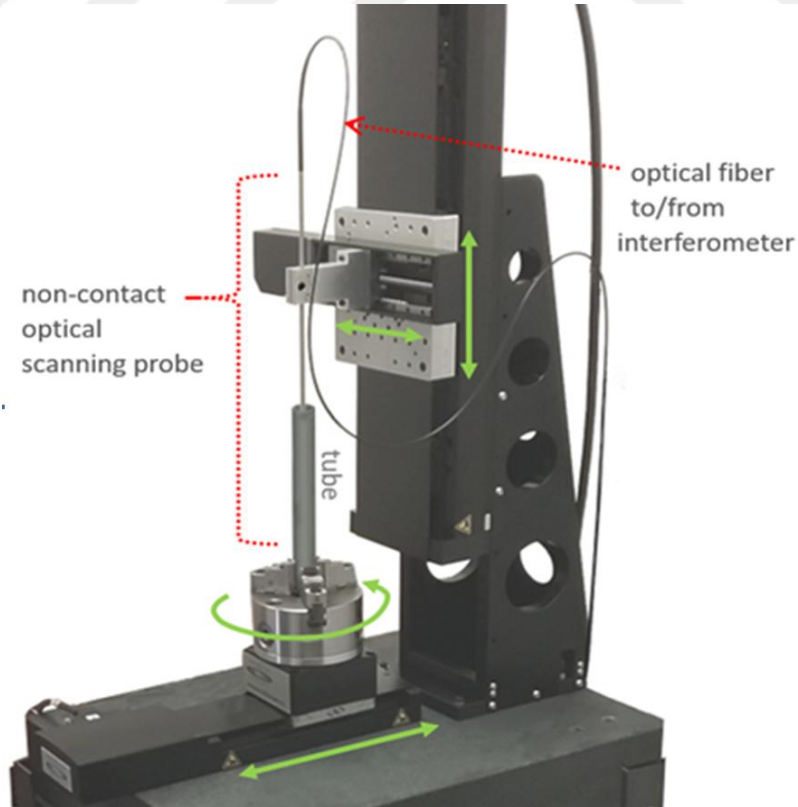
4.2.1.3. İnterferometre;

İnterferometre ise modele gönderilen ışın dalgalarının üst üste binmesiyle aradaki uzaklığı dalga boyu olarak hesaplayabilen çok hassas bir yöntemdir. Hassasiyet değerleri nanometreler mertebesinde. Ürünü algılayan ışın, üründen yansıyan ışını karşılamadaki referans ışık olması gerekliliğinden dolayı, kuvvetli bir ışık kaynağına ihtiyaç vardır. Bu yöntem astronomi, fiber optik, metroloji, sismoloji, plazma fiziği gibi birçok farklı alanda uygulanan bir yöntemdir. Takım tezgâhlarının lineer ve açısal hatalarının ölçülmesinde kullanılan yöntem, lazer interferometredir (Şekil 4.17) [32].



Şekil 4.17. Lazer interferometrenin takım tezgâhları doğrusal hataların ölçümü [32].

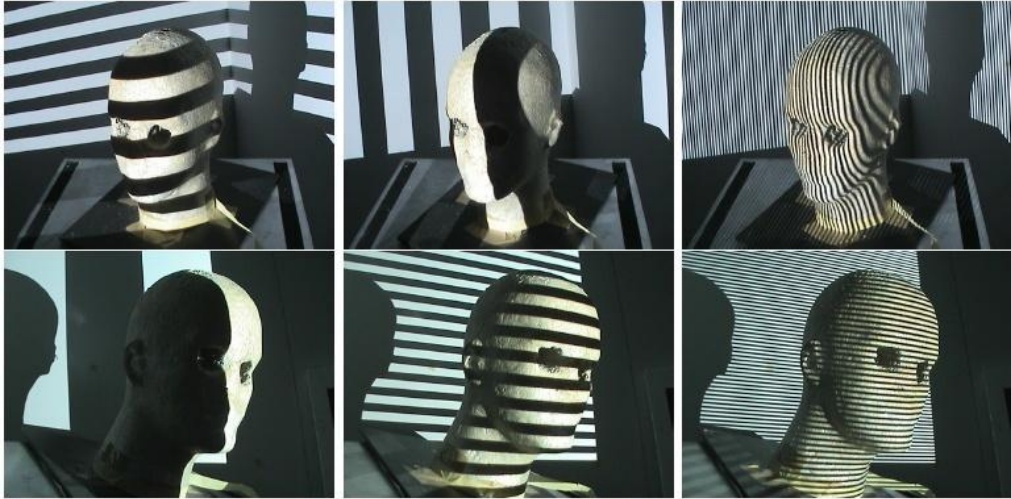
İnterferometre sistem ile boru içi bozukluklar ve aşınmalarda ölçülebilir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. İnterferometre boru incelemesi NOVACAM [37]

4.2.1.4. Yapısal Işıklandırma;

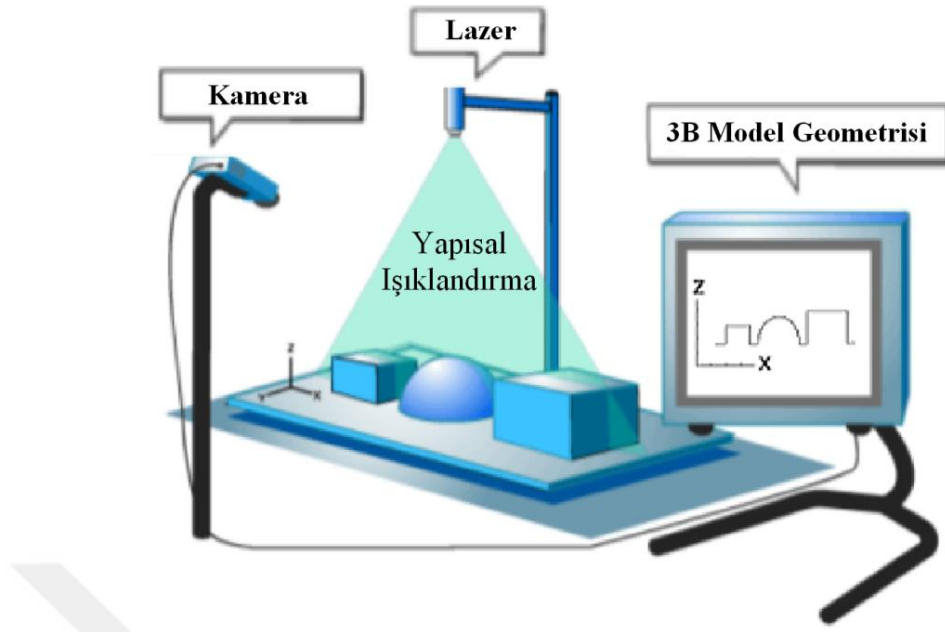
Yapısal ışıklandırılmalı tarayıcılar, modelin üzerine çizgisel bir ışık yansıtılarak, model üzerinde ışığın oluşturduğu çizgisel desen verisinin birbirinden farklılık durumuna bakar. Çizgisel desen, tek boyutlu veya iki boyutlu olabilir. Tek boyutlu bir desen örneği bir çizgidir. Desenli projektörden biraz uzak duran bir kamera, çizginin şekline bakar ve çizgi üzerindeki her noktanın mesafesini hesaplamak için üçgenleme metoduna benzer bir teknik kullanır. İki boyutlu bir desenin bir örneği, bir ızgara veya bir çizgi şerit modelidir. Çizgi desenin birbirinden farklılıklarına bakmak için bir kamera kullanılır ve modeldeki her noktaya ait mesafeyi hesaplamak için bir algoritma kullanılır. Hedef boyunca yatay olarak bir dizi paralel ve dikey lazer ışını düşürülür. En basit durumda, bir görüntüyü analiz edebilir ve soldan sağa çizgili dizinin dizideki lazerlerin sırasını yansıttığını varsayar, böylece en soldaki görüntü şeridi ilk lazerdir, diğeri ikinci lazerdir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Yapısal ışıklandırma ile model üzerinde oluşan çizgisel desen [38]

Yapısal ışıklı 3B tarayıcıların avantajı özellikle hızdır. Her seferinde bir nokta taramak yerine, yapılandırılmış ışık tarayıcıları birden fazla noktayı veya tüm görüş alanını bir kerede tarar. Buda modeli hareketten kaynaklanan bozulma problemini azaltır veya ortadan kaldırır. Taramayı desenin çizgisel bir şerit halinde olmasıyla yapar (Şekil 4.20) [34].

Hareketli nesneleri de gerçek zamanlı olarak yapısal ışıklandırma sistemi ile tarama yapılabilmektedir.



Şekil 4.20. Yapısal ışıklandırma ile oluşan desenin çizgisel şerit geometrisi [39].

4.2.1.5. Stereo Görüntü Analizleri;

Stereo görüntü analiz yönteminde iki kamera tarafından gerçek zamanlı alınan görüntü çifti ile birbiri aralarında eşleştirme yapılarak oluşan derinlik haritasına göre modelin 3B geometrisi elde edilir. Gölgeleştirilmiş derinlik haritası görüntüsü ile model ürünün sürekli değiştirilmesi gerekliliğinden dolayı çekilen kamera görüntü ve noktalar arasında bağlantı kurmak çok zor olduğundan tercih edilen bir yöntem değildir (Şekil 4.21) [39].



Şekil 4.21. Stereo analiz sistemiyle elde edilen derinlik haritası [40].

Optik tarama yöntemlerinden kullanılan iki sistem daha vardır. Bunlar fotogrametri ve topografik sistemine göre taramadır.

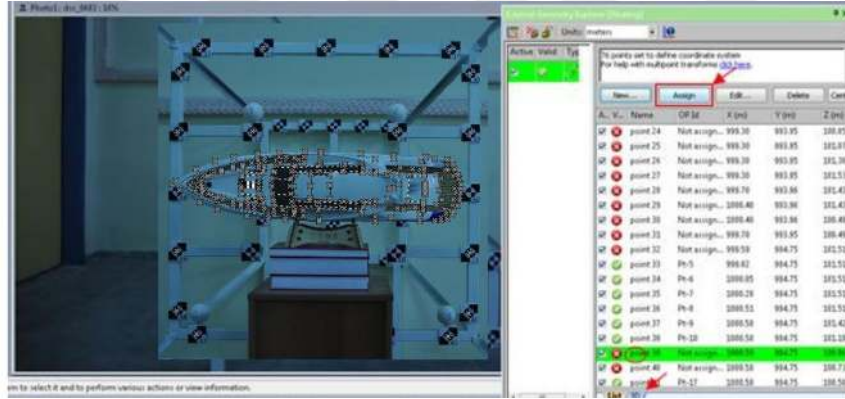
4.2.1.6. Fotogrametri Yöntemi

Fotogrametri prensibine dayanan ölçüm sistemleri ile büyük cisimler fotoğraf çekimleri yapılarak ölçülebilmekte ve 3B model görüntüleri oluşturulmaktadır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Yersel fotogrametri yöntemi ile model geminin üst, ön ve alt görüntüsü [41].

Kontrol ve bağlama noktaları işaretlenmesi sonrasında eşleştirme işlemi için bir fotoğraf referans olarak seçilir ve her bir noktanın yeri diğer üç fotoğrafta da gösterilerek eşleştirme işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra yerel koordinat sisteminden, referans koordinat sistemine geçiş için kontrol noktalarının referans koordinat sistemindeki koordinatları (X, Y, Z) sisteme girilir (Şekil 4.23) [41].



Şekil 4.23. Fotogrametri gemi fotoğraf çekimi sonrası nokta eşleştirmesi [41].

İlgili sayısallaştırma programı ile model geminin yersel fotogrametri yöntemi ile üç boyutlu modellemesi oluşturulmuştur (Şekil 4.24) [41].



Şekil 4.24. Model geminin oluşturulan 3B modeli üst görünüşü [41].

4.2.1.7. Topografik Yöntemi

Harita bilgisi yer yüzün yapısı ve bitki örtüsü hakkında bilgi edinmek için fotoğraf çekilerek ilgili sayısallaştırıcı programlarda model oluşturulabilir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Topografik yöntem ile havadan ve yerden foto çekimi [42].

Çekilen görüntülerden 3B model harita üretiminde kullanılır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Havadan topografik yöntemiyle oluşturulan 3B katı model harita [43].

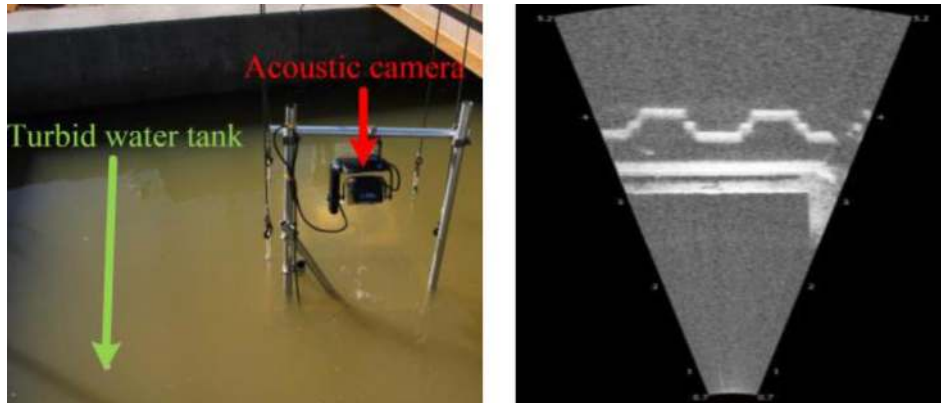
4.2.2. Akustik Yöntemi

Akustik yöntemde model yüzeyine gönderilen ses dalgaları yansımalarını sayısallaştırıcı programlar kullanarak modelin 3B görüntüsünü çıkarma mantığı ile çalışır. Sonar cihazları akustik ses dalgaları ile çalışırlar. Ses kaynağı ile nesne yüzeyi arasındaki mesafeyi ses hızına göre ölçerek modelin geometri görüntüsünü çıkarmaya çalışır. Yüksek ses dalgaları gönderip yansımaları göre kesitler halinde dinamik görüntüleme yaparak nesnenin iç yapısı ve kaba görüntü verileri elde edilebilir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Akustik yöntem ile kesitler halinde dinamik görüntüleme [44].

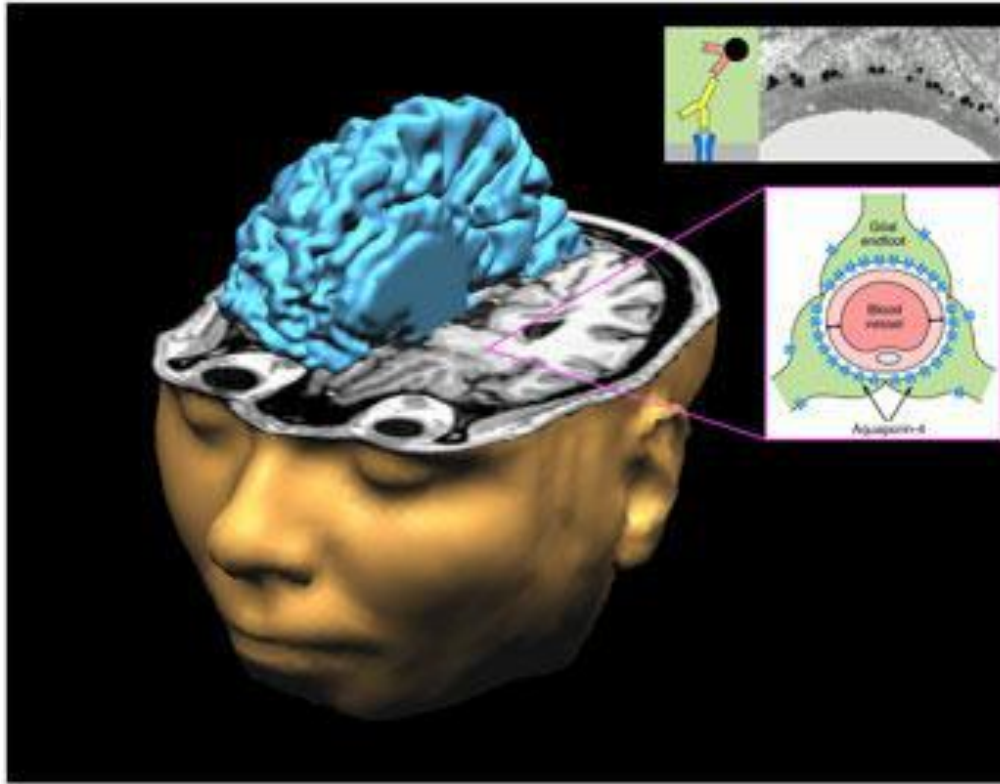
Özellikle sualtı nesnelerinin üç boyutlu yeniden yapılandırılması ve analizi için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Ortam şartlarından kaynaklanan kısıtlanmalarda da, görüntüleme teknolojisi olarak akustik kameralar kullanarak yine nokta bulutu şeklinde ürünün modelini çıkarmayı amaçlamaktadır. Akustik kameralar akıcı sularda bile net detaylarla nesne görüntüsü sağladıkları için, 3B ölçüm sistemlerine de uygulanabilirler (Şekil 4.28) [44].



Şekil 4.28. Sualtı akustik kamera görüntüsü elde edilmesi [44].

4.2.3. Manyetik Alan Yöntemi

Manyetik alan yönteminde ölçüm manyetik alanın model yüzeyine temas etmesi ile temas ettiği nokta ile aradaki mesafeyi hesaplayarak ölçüm yapma prensibiyle çalışır. Model üzerine gönderilen frekansı belli olan radyo dalgaları ürünün yüzeyine çarpıp tekrar geri kaynağa doğru yansımalarıyla ölçüm değeri oluşturur (Şekil 4.29). Manyetik ölçümde MR ve CT cihazı manyetik esasına dayalı olarak çalışmaktadır. MR cihazı radyo dalgalarının yansımalarına göre ölçme yaparak 3B model geometri görüntüsünü oluşturulur [39].



Şekil 4.29.Manyetik alan yöntemi [39]

4.3. Tersine Mühendislikte Veri Toplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Veri toplama yöntemlerinde iki temel yöntem olan temaslı ve temassız yöntemin avantaj ve dezavantajları Tablo 1 ve 2'de gösterilmektedir;

Tablo 4.1. Temaslı Tarama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Temaslı Tarama Sistemi	
Avantajları	Dezavantajları
• X,Y ve Z koordinat eksenlerinin tümünde doğruluk ve yüksek hassasiyette tarama imkanı (Örnek $\pm 0.001\text{mm}$) • Yüzey geometrisi tanımlı olan model ürünlerin çok hızlı tarama imkanı • Otomatik veya manüel olarak model ürünü tarama yapma imkanı. • Yüzeyde bulunan toz, yağ ve sıvılara rağmen doğru tarama yapılabilmesi.	• Prob ucun model yüzeyine değme zorunluluğu olması. • Prob ucun model yüzeyine temasında, model yüzeyinde deformasyon oluşabilmesi. • Malzeme özelliği yumuşak olan model ürünlerde uygun değildir. • Konkav ve karmaşık geometriye sahip yüzeylerde istenen tarama verilerinin oluşturulamaması • Oldukça yüksek cihaz fiyatı • Geometrisi çok büyük modellerin taramasının ya imkansız ya da zor olması.

Tablo 4.2. Temassız Tarama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Temassız Tarama Sistemi	
Avantajları	Dezavantajları
• Model ürüne temas etmeden taramanın yapılması. • Model ürünlerin taramasının özellikle düz yüzeylerde çok hızlı yapılabilmesi • Model ürün yüzey geometrisinin özellikle Z ekseninde hassas tarama imkanı ($\pm 0.001\text{mm}$ veya daha iyi) • Yüzey geometrisi karmaşık ve konkav olmasına rağmen taramanın yapılabilmesi • Malzeme özelliği yumuşak olan model ürünleri tarama yapılabilmesi • Çok küçük boyutlu model ürünleri taramanın mümkün olması (1mm^2) • Geometrisi çok büyük modellerin taramalarının yapılabilmesi	• Cihaz fiyatlarının çok yüksek olması • Yansıtıcı özelliği olan model ürünlerin taranması mümkün değildir. (Lazer tarama sistemi hariç.) • Ergonomik ve kullanımının kolay olup, model ürünün istenilen yere taşıma ihtiyacı olmadan tarama yapılabilmesi • Model ürün X ve Y eksenlerinde taramanın hassasiyetinin yeterli olmaması (0.035- 0.060 mm) • Model üründe geometrisinde çentikli bölgelerin veya dik yüzeylerin taranamaması • Çevresel dış etkenlerden olan havadaki tozdan bile etkilenmesi

5. TERSİNE MÜHENDİSLİK, UYGULAMA VE KULLANIM ALANLARI

Ürün geliştirme amacı ile yapılan projelerde ürünün üretimden dolayı oluşan problemler giderilmekte, üründe yapılacak değişiklikler uygulanıp yeni bir ürün ve geliştirilmiş hali müşterilere sunulmaktadır.

Yeni ürün tasarımında üretilecek üründen bir örnek sunabilmek için hızlı prototipleme yapılarak örnek bir ürün üretilip, prototipin istenilen ürüne uyumluluğu kontrol edilmesiyle uygunluğu durumunda üretime geçilebilir. Tersine mühendislikte ürünün hızlı prototipleme ürünü ile CAD model tasarımlarını karşılaştırma yaparak yeni ürün üretme yeteneklerini geliştirme ve yeni ürünlerin hassas ölçümlerini yapabilmek için kullanılır. Üç boyutlu nesne ve ürünlerin yeniden oluşturulma süreci, üretim endüstrisinde, tıbbi cihaz üretim endüstrisi, askeri alanlarda yapılacak hızlı prototipleme ve araştırma çalışmalarında vazgeçilmez bir gerekliliktir. Askeri alanlarda ise tersine mühendislik güvenlik ile ilgili kontrolleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır [13].

Otomotiv, dayanıklı tüketim, savunma sanayi ve yan sanayilere ürün geliştirme sürecini kısaltan, hassasiyet ve kalite kazandıran bu uygulamaları birçok firma kullanmaya başlamıştır [3].

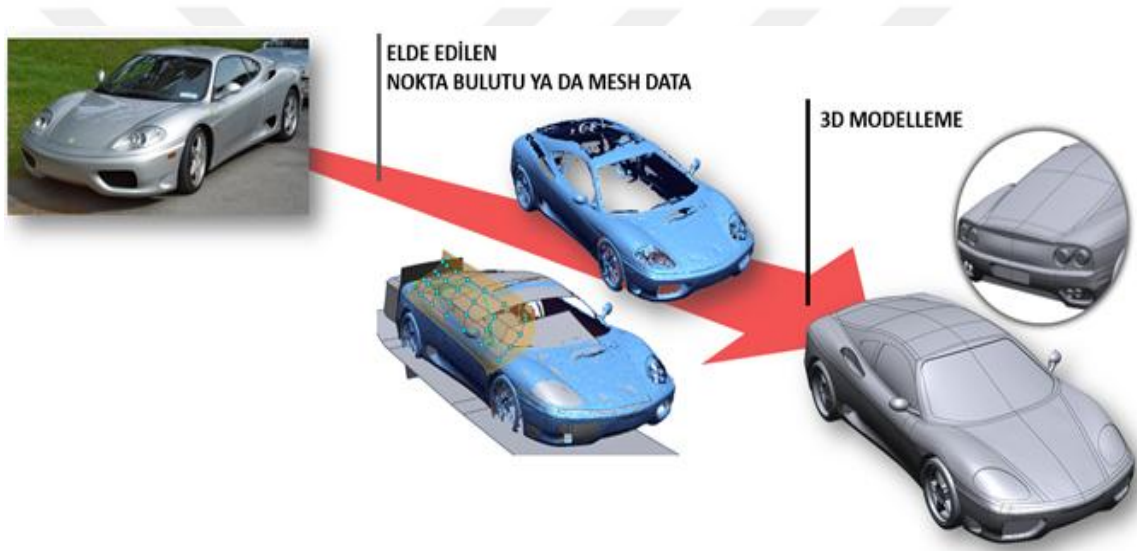
Tersine mühendisliği uygulama alanları listelenecek olursa;

- Çamur, kil, köpük gibi malzemelerden el ile yapılmış endüstriyel tasarım modellerinin sayısallaştırılarak yüzey modellerinin oluşturulmasında.
- Rakip ürün incelemelerinde. sanat eserlerinin restorasyonunda.
- BDT dosyası mevcut olmayan ürün, kalıp, aparat gibi parçaların bilgisayar ortamına aktarılmasında, kalıp ve aparatların kalite kontrolünde,
- Diş, protez, uzuv ve benzeri medikal uygulamaların sayısallaştırılarak üretilmesinde.
- Koordinat Ölçüm Makinesinde (CMM) ölçülemeyecek kadar büyük olan ürünlerde,
- Ürünün uygulama yerinde yapılacak olan ölçümlerde,
- Üretim esnasında veya sonradan oluşan çökme, eğilme gibi fiziksel hataların ölçümünde genel olarak kullanılmaktadır [4, 14].

Bilgisayar teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte Bilgisayar Destekli Çizim (CAD), Bilgisayar Destekli Üretim (CAM), Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) gibi günümüzde Tersine Mühendislik (RE) ile modelleme ve üretim yöntemlerinin kullanımı da yaygınlaşmaktadır [10]. Temel kullanım alanlarının birkaçı ise;

5.1. Otomotiv

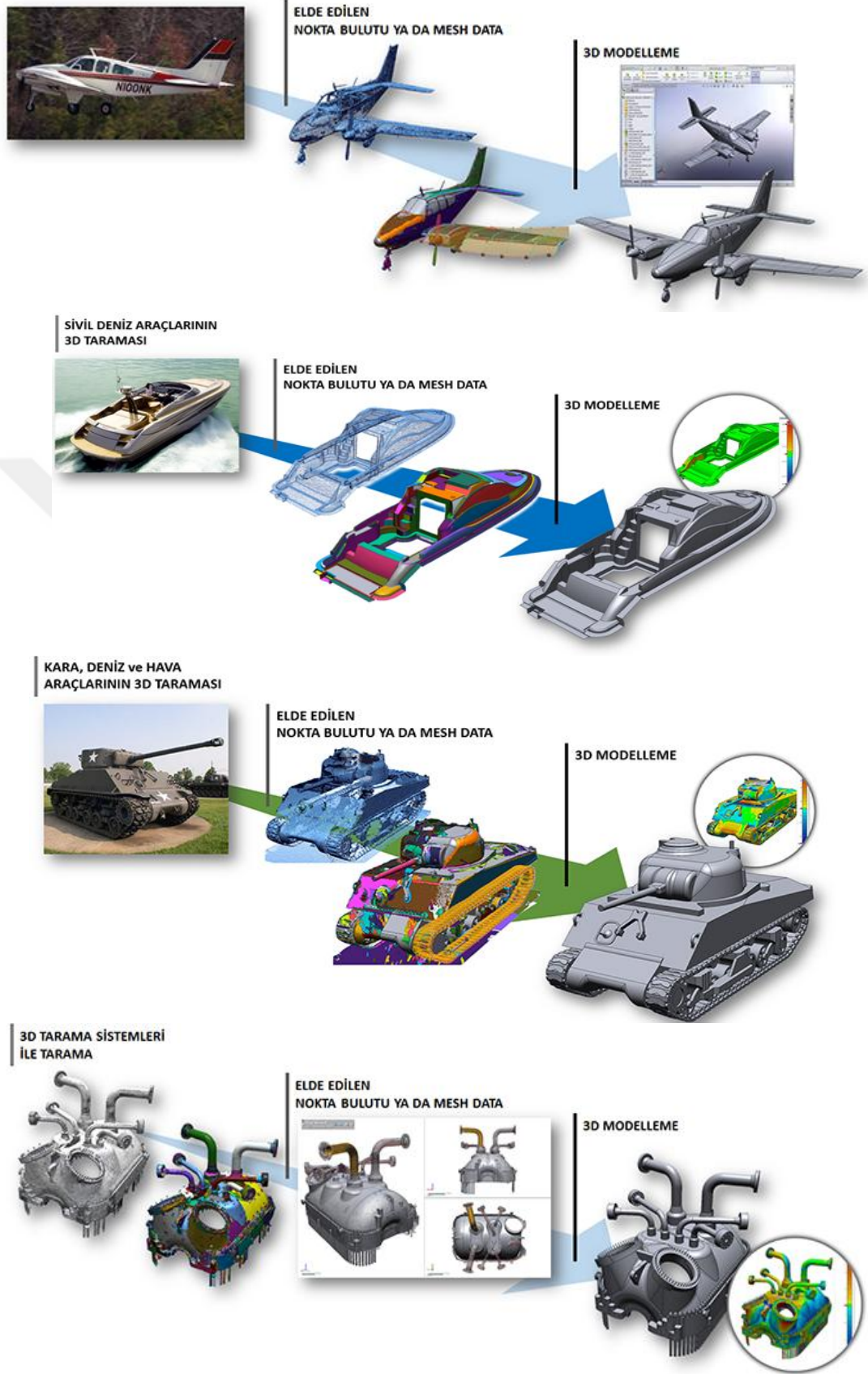
Profesyonel 3B tarayıcılar sayesinde, bir aracın tamamı ya da sadece motor bloğu, şasesi gibi parçalarının nokta bulutu, mesh dataları elde edilir ve projenin amacına uygun işlenerek istenen yüksek hassasiyette 3B modeli oluşturulur (Şekil 5.1) [45].



Şekil 5.1. Otomotiv sanayinde kullanımı [45].

5.2. Hava, Deniz, Uzay Sanayi ve Askeri Araç Modelleme

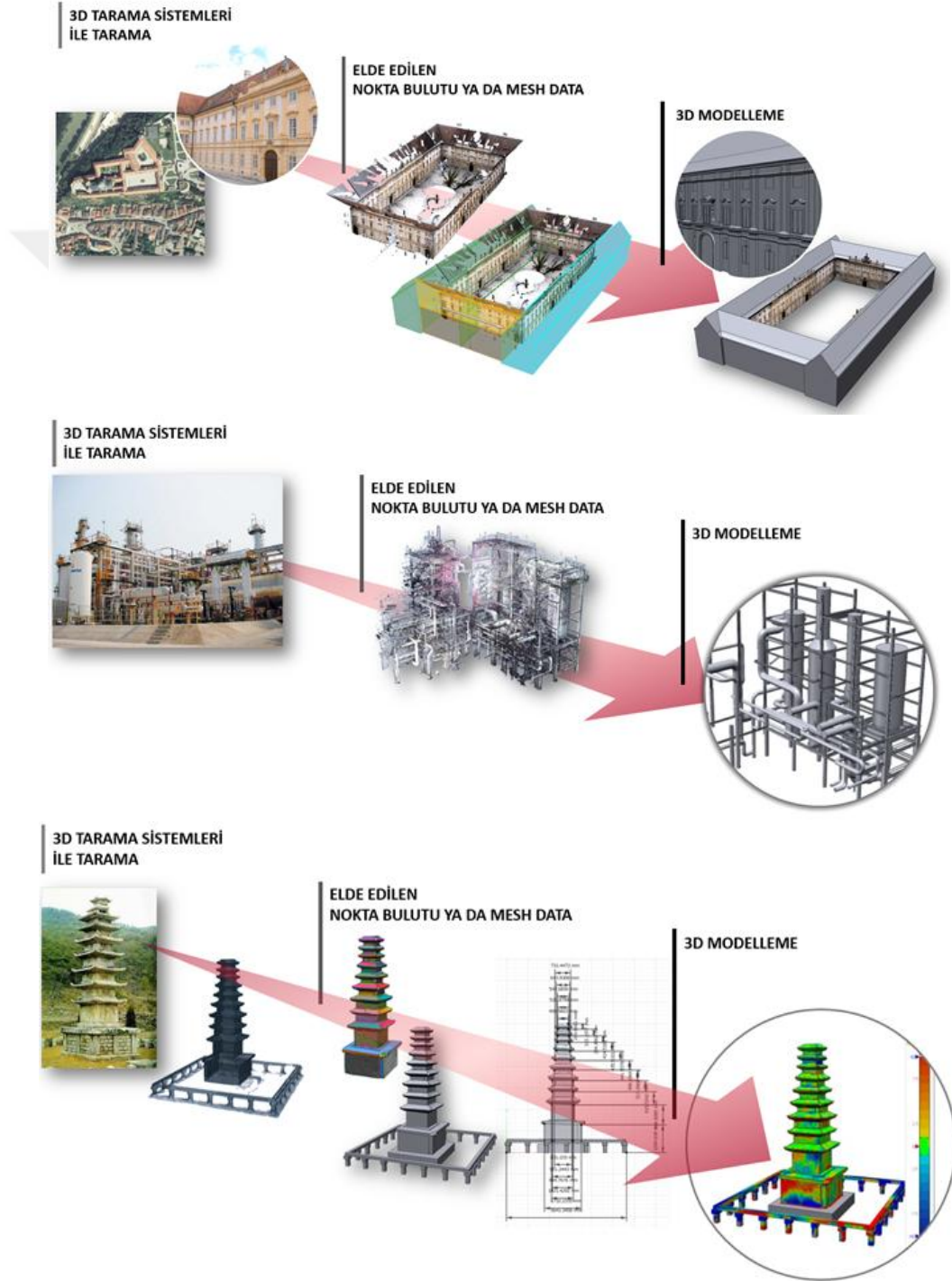
Havacılık ve uzay sanayileri, gerek askeri gerekse sivil açıdan taşıdıkları önem nedeniyle 3B tarama sistemlerinden simülasyona pek çok teknoloji çözümünü sıklıkla kullanmaktadır. Yelkenliden tanker ya da denizaltına, farklı pek çok deniz taşıtının ve ilgili donanımlarının 3B tarama ve modellemesinde, gerek kara, hava ve deniz araçlarının tasarım ve mühendislik süreçlerinde gerekse askeri araçların eğitimlerindeki riskleri önlemede savunma sanayinde kullanılmaktadır (Şekil 5.2) [45].



Şekil 5.2. Hava, deniz ve uzay sanayinde, askeri araç ve parça modelleme ve kalite kontrol [45].

5.3. Mimari ve İnşaat Sektöründe

Tek katlı bir binadan, dev bir fabrikaya kadar her ölçekte yapının tasarımında, inşaa muayenesinde, tesis planlamasında, kültürel mirasların restorasyonunda ve maket prototip- lerinin üretiminde kullanılmaktadır (Şekil 5.3) [45].



Şekil 5.3. Mimari ve inşaat sektörü bina tasarımı, restorasyon ve kültürel miras [45].

5.4. Tıp ve Medikal

Kişiye özel ortez ve protezlerin üretiminin yanı sıra cerrahi operasyon öncesi gerek hasta bilgilendirme, gerekse ameliyat simülasyonları için organların prototiplenmesi ve estetik müdahale öncesi yapılacak restorasyonda, hasta cerrah mutabakatının sağlanması gibi süreçlerde 3B tarama, yoğun olarak başvurulan bir yöntemdir (Şekil 5.4) [45].



Şekil 5.4. Tıp ve medikal alanda protez tasarımı [45, 46].

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Tıpta 3B model oluşturma ve analiz işlemleri çalışmaları, bilgisayar yazılımları ve tıptaki yeni gelişmelere bağlı olarak artış göstermektedir. Bu alanlardan biri de tıbbi görüntüleme sistemlerinden alınan verilerin analiz programlarına aktarım amacıyla kullanılmasıdır [10].

Cerrahi müdahale öncesi bilgisayar ortamında cerrahi planlamanın yapılması zaman, maliyet ve doğru operasyon bakımından yeni olanaklar sağlamaktadır. Tıp biliminde görüntüleme teknikleri kullanılarak yapılacak cerrahi operasyon öncesi bilgisayar destekli planlamalar son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Kafatası şekil bozukluğunun düzeltilmesinde de yine bilgisayar desteğiyle ameliyat gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında oluşturulan katı modelleme çalışmaları, kalça, pelvis, vertebra ve distal radius deformiteleri gibi birçok ekstremitte uyum ve dizilim bozuklukları için düzeltme planlamalarında çok yararlı olmaktadır [47].

Günümüzde aktif olarak kullanılan başlıca tersine mühendislik yazılımlarından olan RapidForm, OptoCAT, CappsNT, Studio, CopyCAD, 3D-DOCTOR, Mimics, Imageware, Geomagic vb. model ürünün sayısallaştırmış verilerinden çıkan 3B nokta bulutu verisi elde edilir. Bu yazılımlar yardımıyla toplanan verileri 3B CAD katı model haline çevrilebilir. 3D-DOCTOR, Mimics gibi yazılımlar aracılığıyla biyomodellerin oluşturulmasında, kemik model oluşumu için CT verilerinden, yumuşak dokuların oluşturulması için DICOM formatındaki tomografik görüntü verilerinden faydalanılır.

Bu çalışmada diz protezi takılacak olan bir hastanın çekilen Bilgisayarlı Tomografisi (BT) görüntü dosyası olan DICOM formatındaki görüntüsünden faydalanılarak operasyon öncesi tasarlama ve planlamaların yapılabilmesi için kemik 3D-DOCTOR programından faydalanılarak Bilgisayarlı Tomografi görüntünün 3B CAD model verisi elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca ameliyat esnasında temaslı veri toplama yönteminden faydalanılarak planlanan operasyon için femur ve tibia kemik kesileri oluşturularak protez parçalarının takılma aşamaları anlatılmıştır.

6.1. Deneysel Çalışma 1

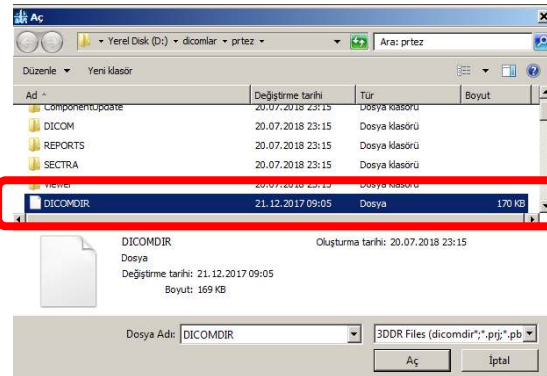
İnönü Üniversitesi, Turgut Özal Tıp Merkezinde uyluk (femur) ve kaval (tibia) kemiklerine ait Bilgisayarlı Tomografisi (CT) çekilen bir hastanın, Medikal Görüntü Formatı DICOM görüntüsü Şekil 6.1'de verilmektedir.



Şekil 6.1. Medikal görüntü formatı DICOM görüntüsü

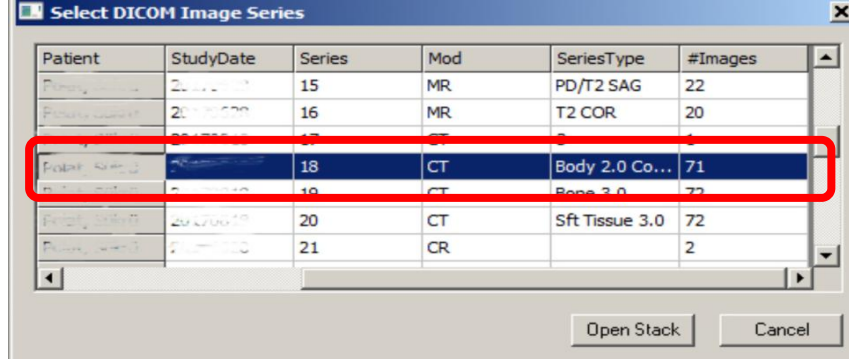
Tersine mühendislik uygulamasında, DICOM formatındaki görüntüyü 3B model formuna çevirmek için 3D-DOCTOR programının Demo Versiyonu [48, 49, 50] kullanıldı. Bu uygulamanın 3D-DOCTOR programındaki işlem basamakları sırasıyla;

1- File-Open: DICOM formatlı görüntü klasörünün içinde DICOMDIR adlı dosya seçilerek 3D-DOCTOR programda 3B model yapılan dosya açıldı (Şekil 6.2).



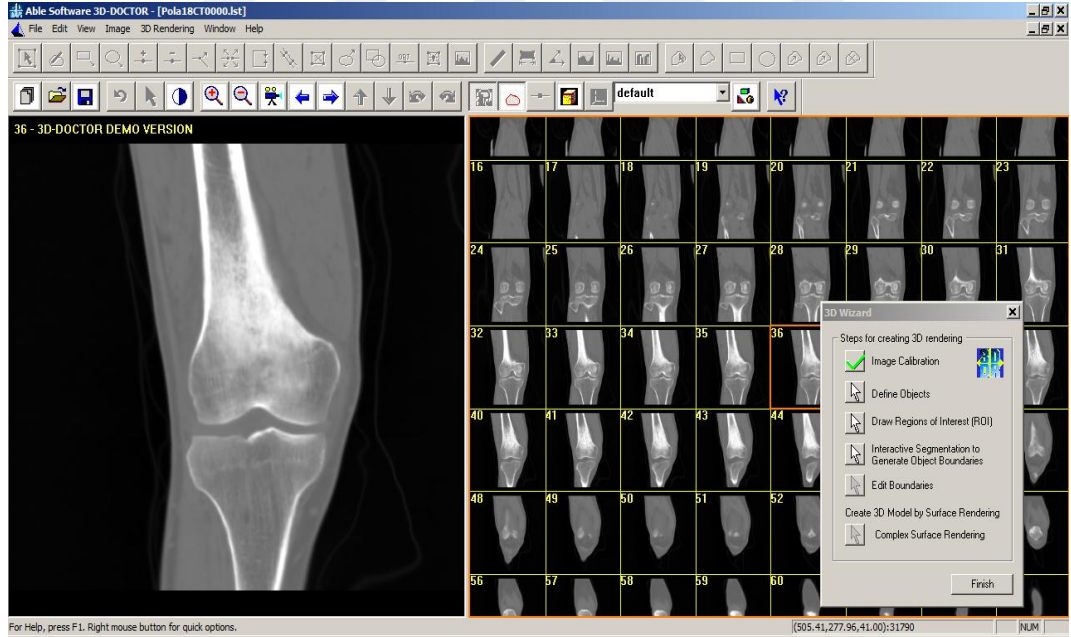
Şekil 6.2. DICOM formatındaki görüntüyü DICOMDIR adlı dosyayı seçerek açma

2- Select DICOM Image Series: 3B model formatına çevrilecek 71 katmandan oluşan ilgili bilgisayarlı tomografi görüntüsü seçildi (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. DICOM formatındaki CT görüntü seçimi

3D-DOCTOR programının sağ alt bölümünde açılan 3B model oluşturulma sihirbazı olan 3D Wizard kullanılarak, istenilen sıralama ile seçili olan bilgisayarlı tomografi görüntünün 3B modellemesi yapıldı (Şekil 6.4).

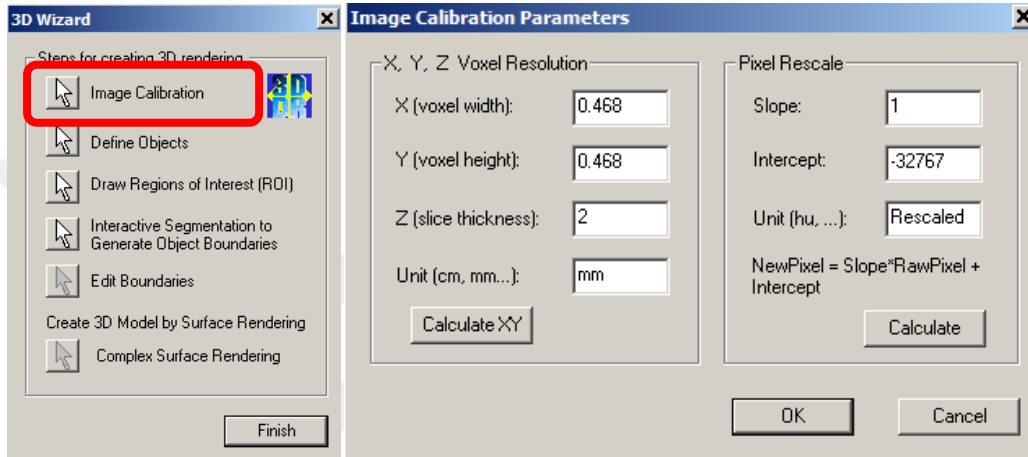


Şekil 6.4. 3B model oluşturma sihirbazı 3D Wizard

3- Image Calibration: Bilgisayarlı tomografi görüntüsünün çekim özelliklerine göre çözünürlük değerlerin olduğu, 3B model yapılacak görüntünün X genişlik, Y yükseklik ve Z tabakalar aralık mesafesi ölçek değerlerini veren diyalog penceresidir. Bilgisayarlı tomografi çekimi esnasında oluşan değerler olduğu için bu değerler genelde değiştirilmez.

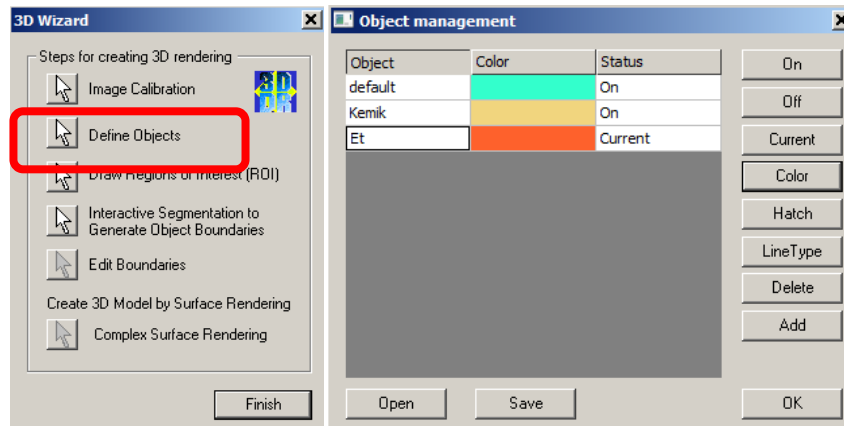
Özellikle Z (Slice thickness) bilgisayarlı tomografi görüntüsünün tabakalar halinde kaçar mm aralıklarla çekildiğini gösterir. Z (Slice thickness) değeri bilgisayarlı tomografi çekiminde çok düşük aralıklarla yapılır ise katmanlar arası görüntü çok daha net olacağından yüksek hassasiyette 3B model veri elde edilir.

Z (Slice thickness) 2 mm, X genişlik çözünürlüğü 0,468 mm ve Y yükseklik çözünürlüğü 0,468 mm olacak şekilde ayarlandı (Şekil 6.5).



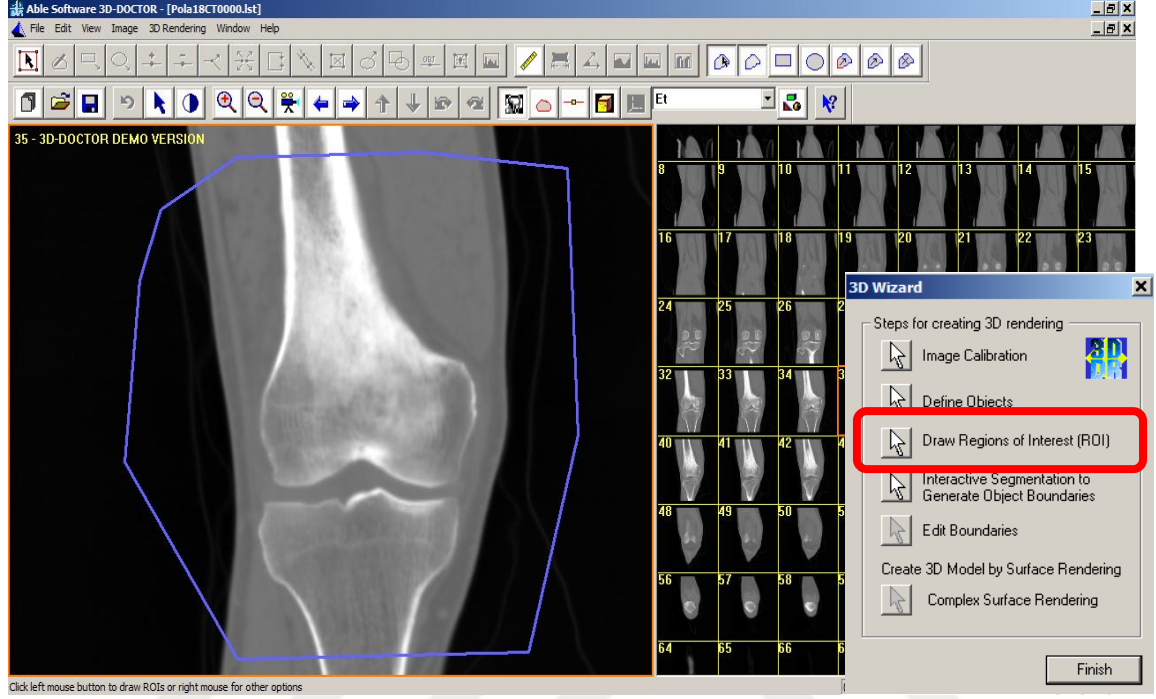
Şekil 6.5. Image Calibration Parameters diyalog penceresi

4- Define Objects: 3B model görüntüsünde kemik ve et dokusunu ayırmak amacıyla ve ayrı renklere görünmesi için, Add sekmesinden et ve kemik isminde 2 adet doku eklendi. Color sekmesinden oluşturulan et ve kemik doku görüntüsünün renklerini açık kahve ve koyu kahve olacak şekilde seçildi. On ve Off sekmelerinden dokuların görünürlüğü seçimi, On seçilerek görünür olarak tanımlandı (Şekil 6.6).



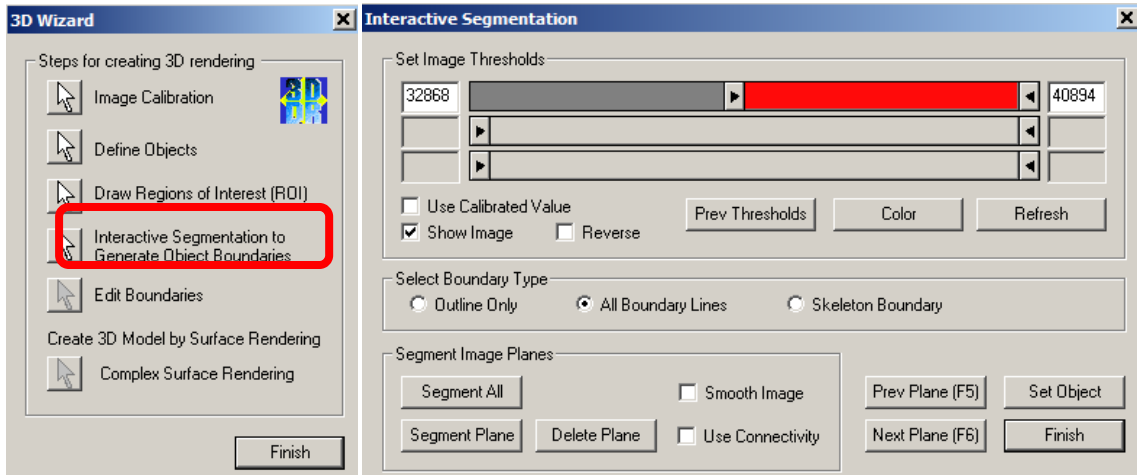
Şekil 6.6. Define Objects diyalog penceresi

5- Draw Region of Interest (ROI): 3B modelleme yapılacak görüntünün hangi alanını kapsadığını belirlemek için, görünüm üzerinde noktasal seçimler ile mavi renkte çizgisel olarak alan seçimi yapıldı (Şekil 6.7).



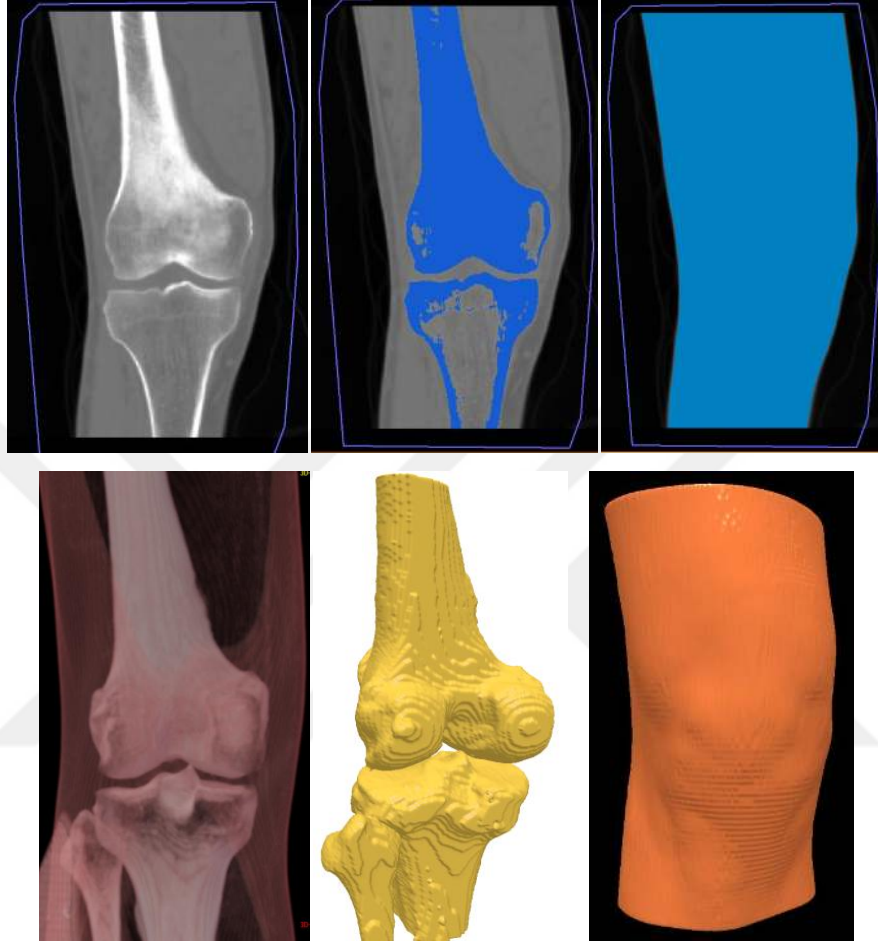
Şekil 6.7. Draw Region Of Interest (ROI)

6- Interactive Segmentation to Generate Object Boundaries: Bilgisayarlı tomografi formatındaki görüntüde kemik dokusunu belirlemek için Set Image Thresholds sekmesinde açık renk profiline uygun seçim aralıklarıyla kemik sınırları belirlendi (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Interactive Segmentation diyalog penceresi

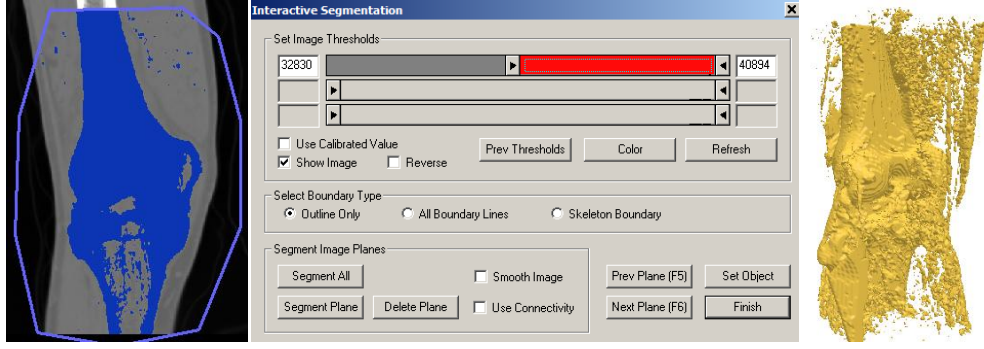
Select Boundary Type sekmesinde et ve kemik dokusunun birlikte seçimini yapmak için Outline Only seçildi. Sadece kemik dokusu seçimi yapmak için All Boundary Lines seçildi (Şekil 6.9).



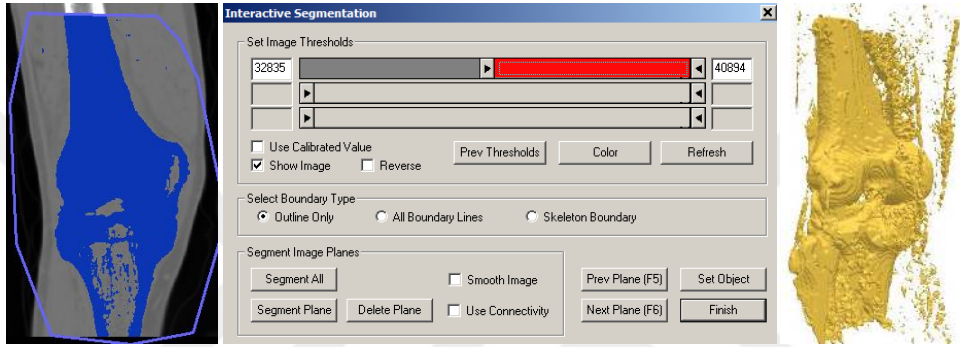
Şekil 6.9. Interactive Segmentation, Select Boundary Type sekmesi

Bilgisayarlı tomografi görüntüde açık beyaz kısımların kemik dokusu olduğu ve Set Image Thresholds seçim aralıklarında bu duruma göre seçim yapılması gerekir. Set Image Thresholds sekmesinden ayarlanan kemik dokusu formunu bilgisayarlı tomografi görüntünün 71 adet olan tüm katmanlarına uygulamak için, Segment Image Planes sekmesinden Segment All seçildi.

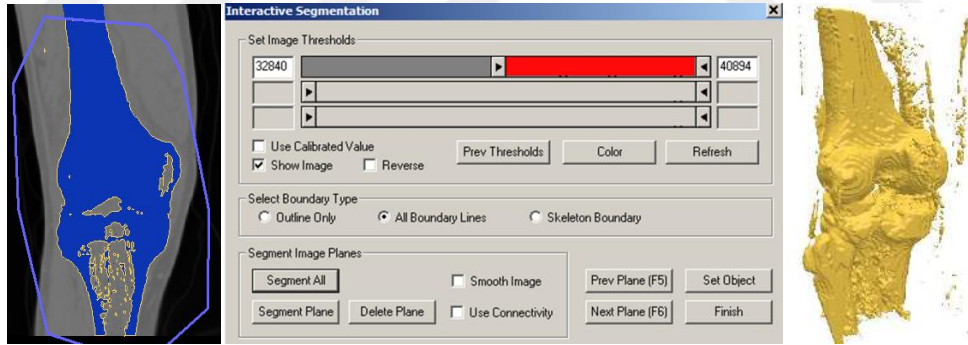
Set Image Thresholds kemik dokusu formu seçim aralığını belirlerken uygun değer aralığında seçim yapılmadığında (Şekil 6.10-13) kemik dokusu formu tam olarak oluşmamıştır. Denemeler sonrasında 35. katman 32874-40894 seçim aralığında optimum kemik dokusu formu oluşturuldu (Şekil 6.15).



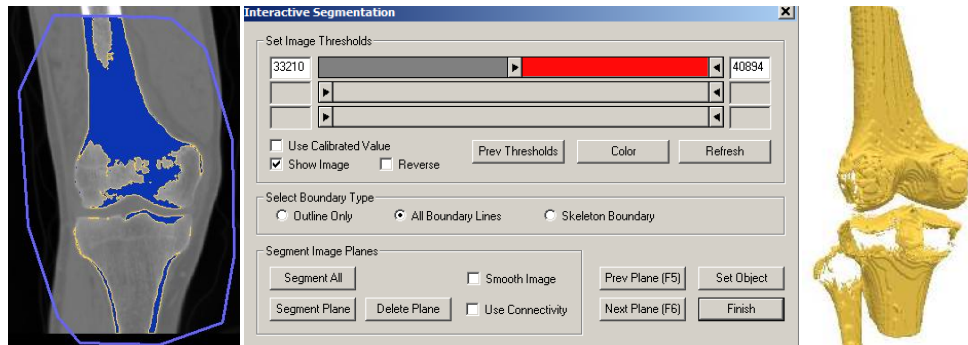
Şekil 6.10. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32830-40894 aralığı



Şekil 6.11. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32835-40894 aralığı

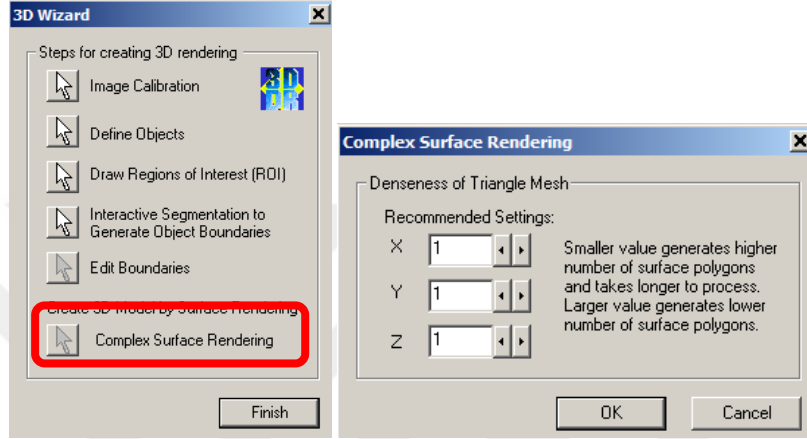


Şekil 6.12. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 32840-40894 aralığı



Şekil 6.13. İnteractive Segmentation, Set Image Thresholds 33210-40894 aralığı

7- Complex Surface Rendering: 3B model görüntü için bilgisayarlı tomografi kemik yüzey dokusunun nokta bulutu formda kaplama yapılmış görüntü verisi alındı. X, Y ve Z ekseninde, ölçek değerlere göre üçgenler oluşturularak yüzey formu oluşturulur. X,Y ve Z ölçek değeri 1 olarak girildiği için çok sayıda üçgen oluşturacağından dolayı işlem süresi uzun olmaktadır (Şekil 6.14). Büyük değerler girilmiş olsaydı daha kısa zamanda hassas olmayan üçgensel yüzeyler oluşurdu.



Şekil 6.14. Complex Surface Rendering diyalog penceresi

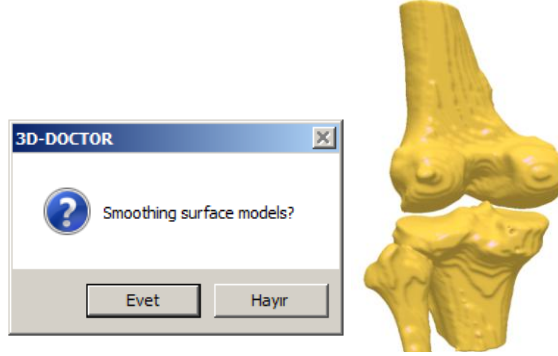
Tomografi görüntüde 35.Katman Set Image Thresholds 32874-40894 aralık nokta bulutu formda istenilen yüzey dokusu oluşturuldu (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. Complex Surface Rendering yapılan kemik dokusu görünümü

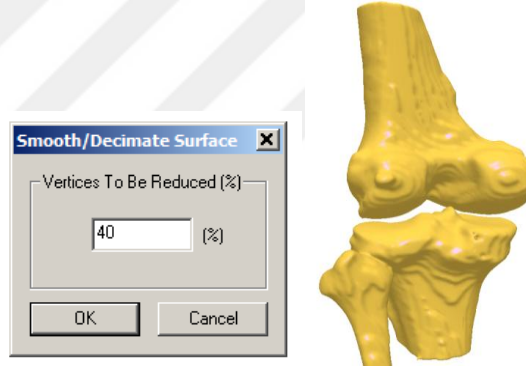
8- Tools - Smooth Surfaces, Simplify Surfaces ve Refine Models Sekmeleri:

Smooth Surfaces sekmesi ile pürüzsüz bir yüzey dokusu elde edildi (Şekil 6.16).



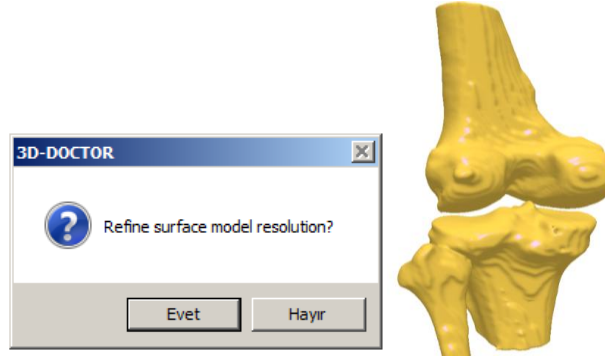
Şekil 6.16. Tools- Smooth Surfaces yapılmış pürüzsüz bir yüzey dokusu

Simplify Surfaces sekmesi ile nokta bulutu verilerinde birleştirmeler yaparak daha sadeleştirilmiş bir yüzey dokusu elde edildi (Şekil 6.17).



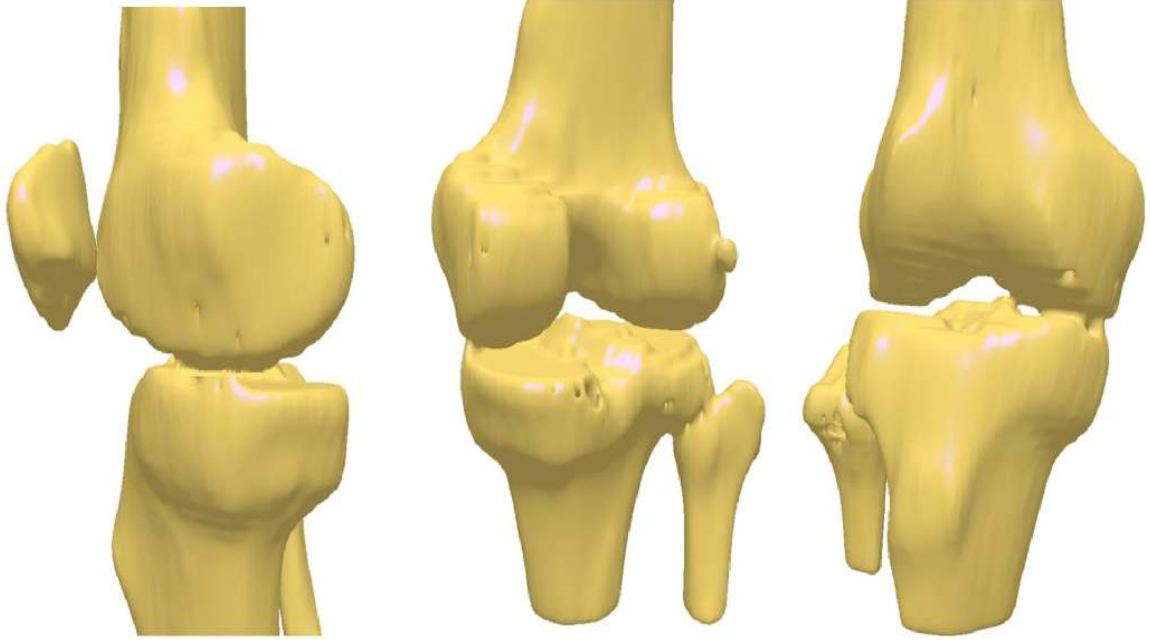
Şekil 6.17. Tools-Simplify Surfaces yapılmış sadeleştirilmiş bir yüzey dokusu

Refine Models sekmesi ile yüzeyde küçük adacıklar halindeki gereksiz noktalardan arındırılmış bir yüzey dokusu elde edildi (Şekil 6.18).



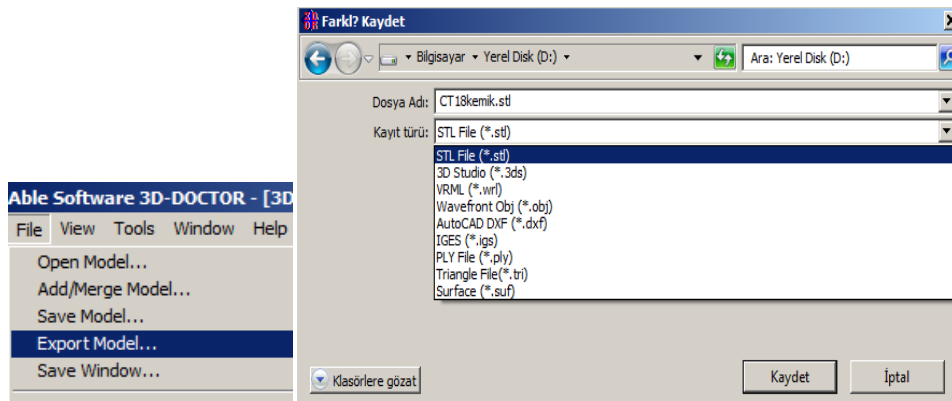
Şekil 6.18. Tools-Refine Models yapılmış gereksiz noktalardan arındırılmış yüzey dokusu

9- View-Object Sekmesi: Kemik yüzeyi dokusuna parlaklık, görsel efektler ile renk ve desen verildi (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. View-Object sekmesinden renk ve desen verilen kemik dokusu

10- File-Export Model Sekmesi İle STL Formatta Kayıt Yapma: Kemik yüzeyinin 3B nokta bulutu formda olan verisinin başka programlarda açılabilmesi ve üzerinde tasarımlar yapılabilmesi için stl, 3ds, wrf, obj, dxf, igs, ply, tri ve suf uzantısı ile kayıt yapılır. En genel 3B model verisi olarak STL formatında kayıt yapıldı (Şekil 6.20).

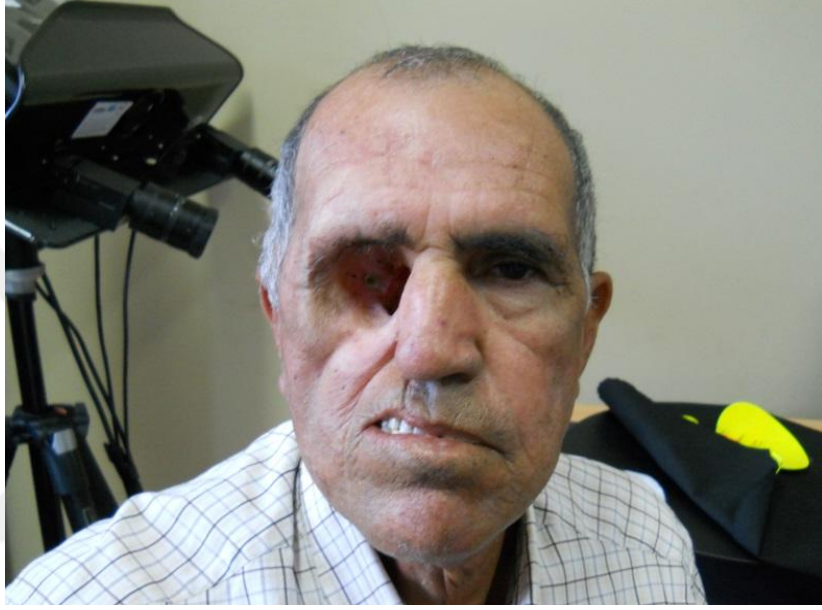


Şekil 6.20. File-Export Model sekmesi ile STL formatında kayıt yapma

Böylelikle ilgili program formatında kayıt yapılan dosya açılarak kemik yüzeyinin 3B model görüntü verisi üzerinde tasarımlar yapılabilir duruma gelmektedir.

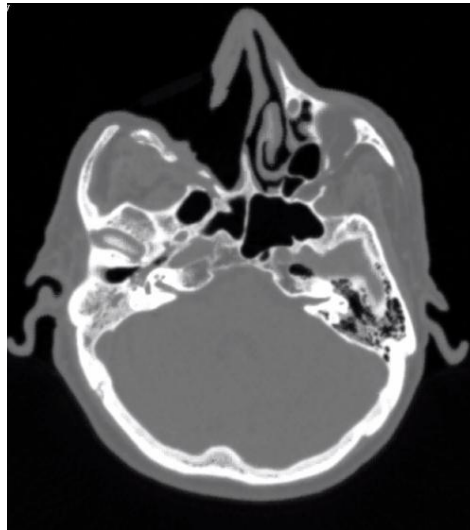
6.1.1. Uygulama Örneği 1

Geçirdiği kemik kanseri nedeniyle elmacık kemiği ve bir gözü alınmış olan bir hastanın kanserli bölgenin alınması ile göz ve şakak kısmında oluşan çukur görüntüsüne uygun bir protez yapılarak kapatılmıştır (Şekil 6.21) [51, 52, 53, 54, 55]. Tersine mühendislik uygulama örneği olarak yapılan Kişiyi Özel Protez Projesi [51] olan yüze protez takılma işlem basamakları sıralanacak olunursa;



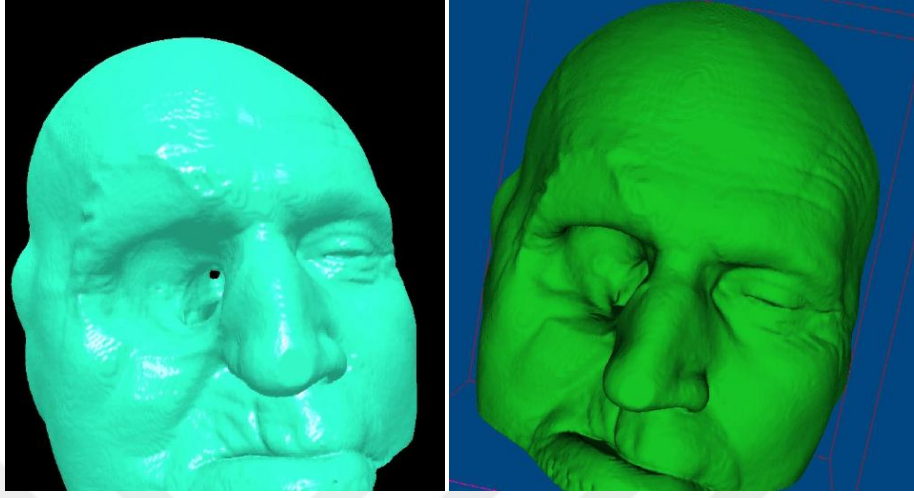
Şekil 6.21. Protez uygulaması yapılan göz ve göz çukuru oluşan hasta [45].

İlgili kişiye ait baş bölgesi bilgisayarlı tomografi görüntüsü çekilmiştir (Şekil 6.22).



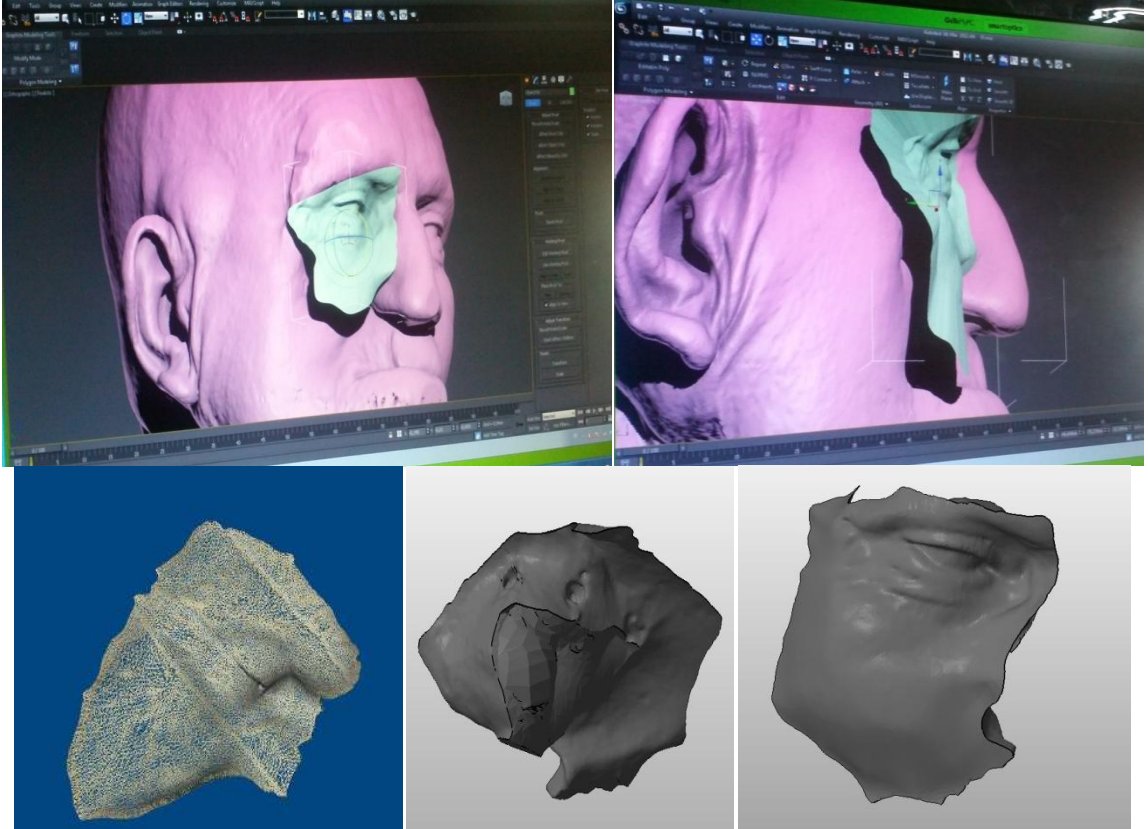
Şekil 6.22. Bilgisayarlı tomografi görüntüsü [51].

Bilgisayarlı tomografi görüntü Deneysel Çalışma 1'de olduğu gibi ilgili sayısallaştırıcı program kullanılarak 3B yüzey dokusu formuna çevrilmiştir (Şekil 6.23).



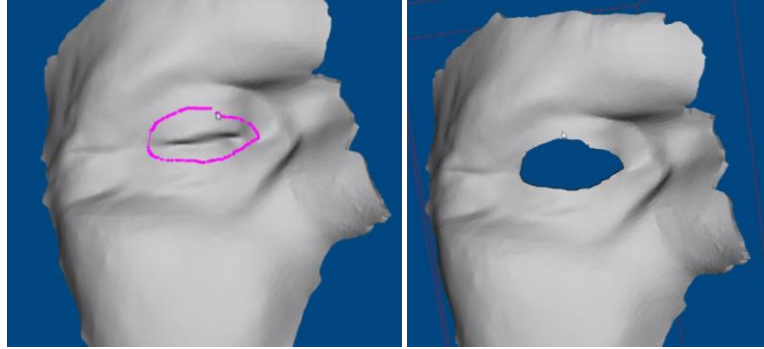
Şekil 6.23. Bilgisayarlı tomografi görüntü 3B yüzey dokusu formuna çevrilmiş hali [51].

3B yüzey dokusu formu sayısallaştırıcı programlarla göz çukurunu dolduracak 3B CAD model protez tasarlanarak, kalıp için model oluşturulmuştur (Şekil 6.24).



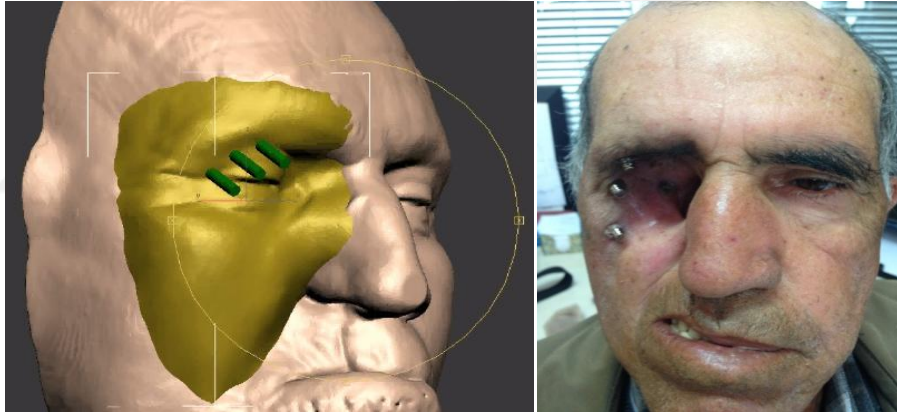
Şekil 6.24. Göz çukuruna yapılacak protezin sayısallaştırıcı programlarla tasarlanması [51].

Tasarlanan model üzerinde göz protezi takılabilmesi için 3B CAD model üzerinde yer belirlenerek tasarlama yapılmıştır (Şekil 6.25).



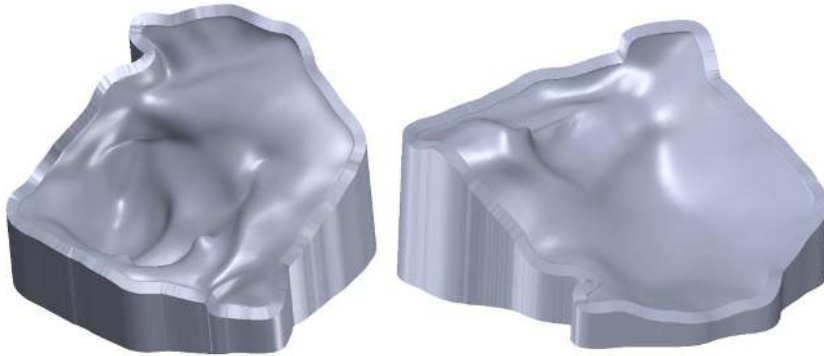
Şekil 6.25. Protez parçada göz bölgesinin tasarlanması [51].

Tasarlanan protezin, istenildiği zaman takılıp çıkarılabilmesi için model üzerine ve yüze açılacak pim deliklerinin konumları belirlenmiştir (Şekil 6.26).



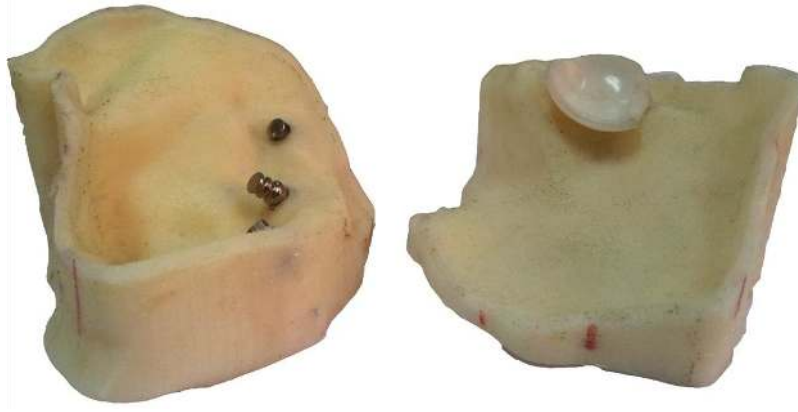
Şekil 6.26. Protezin takılıp çıkarılabilmesi için pim deliklerinin konumları belirlenmesi [51].

Tasarlanan protezin üretilebilmesi için kalıp tasarımı yapılmıştır (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. Protez üretimi için 3B model görünümünde tasarlanan kalıp [51].

Tasarlanması yapılan protez kalıbının üretimi yapılmıştır (Şekil 6.28).



Şekil 6.28. Tasarımı yapıldıktan sonra üretilen protez kalıbı [51].

Kalıptan insan vücuduna uyumlu olan silikondan döküm yapılmıştır (Şekil 6.29).



Şekil 6.29. Silikondan kalıpta üretimi yapılan protez [51].

Protezin ten rengine dokusuna uyumu için fırça ile boyama yapılmıştır (Şekil 6.30).



Şekil 6.30. Protezinin ten rengine uyumu için boyanması [51].

Silikon proteze ayrıca protez göz ve kirpik eklenmiştir (Şekil 6.31).



Şekil 6.31. Silikon proteze, protez göz ve kirpik eklenmesi [51].

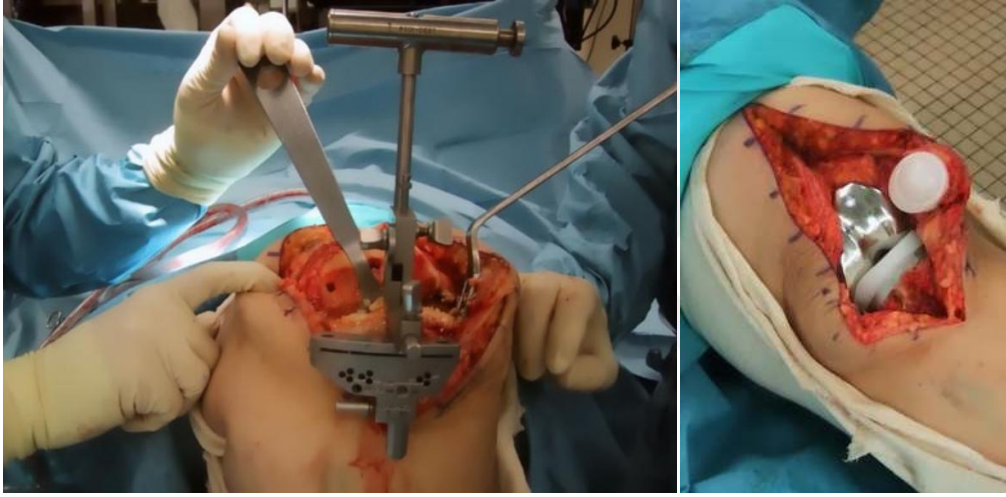
Kişiyi Özel Protez Projesi [51] kapsamında yüze protez takılma uygulaması, tasarımı yapıldıktan sonra üretim yapılan protez hasta yüzüne takılmıştır (Şekil 6.32).



Şekil 6.32. Protez uygulaması tamamlanan hastaya takılmadan önceki ve sonraki hali [51, 52, 54].

6.1.2. Uygulama Örneği 2

İnsan vücudunda bulunan ve çeşitli nedenlerle (kanser, kaza yaralanmaları, hastalık nedeni ile organın gelişmemesi vb. işlevini yerine getiremeyen, kayıp yaşanan veya onarılamayacak kadar hasar gören organların kurtarılması için hastaların anatomileri ile tam uyumlu protez, implant ve cerrahi kılavuzlardan faydalanılmaktadır. Bu protezler günümüz teknolojisinde hasta vücut yapısına tam uygun ve kişiye özel anatomik modelleme ile yapılmaktadır. 3B CAD datalardan elde edilen medikal modeller hastanelerde cerrahi müdahaleler ile insan vücuduna takılmaktadır (Şekil 6.33) [45].

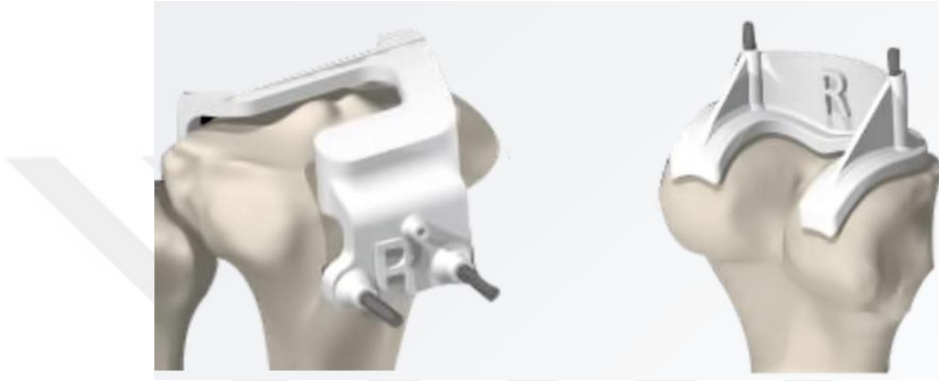


Şekil 6.33. Medikal model protez takılmış hasta[56].

Tersine mühendislik yöntemi ile oluşturulan kemik dokusu 3B CAD medikal modeller ile cerrahi müdahale öncesi kas, sinir ve damarların ilişkileri, kemik yoğunluğu, doku kalınlığı, kemiğin zayıf ve güçlü bölgeleri özel yazılımlar kullanılarak hesaplanarak, yapılacak kesi, vidalama yerleri önceden sanal ortamda çalışılmaktadır. Kesme, ayrıştırma, birleştirme, sinirlerin belirlenmesi gibi uygulamaları içeren simülasyonla ameliyat öncesi planlama ile cerrahi müdahalenin bir nevi tatbikatı yapılmaktadır [45].

Özellikle ateşli silah, patlayıcı madde ve trafik kazalarına bağlı travmalarda kemiklerinin doğru pozisyonlarına getirilmesi, deformasyona uğramış bölgelerinin belirlenmesi ve eksik yerlerin protez veya implantlar ile tamamlanması sağlamaktadır. Simülasyon, cerrahinin başarısını arttırdığı gibi ameliyat sürelerini kısaltarak, hastaların narkoz altında kalma sürelerini azaltarak komplikasyonların önüne geçilmesini sağlamaktadır [45].

Ayrıca bu sanal çalışmanın gerçek cerrahi operasyon sırasında uygulanabilmesi için hastanın çekilmiş tomografi görüntülerinden elde edilen organ dataları üzerinden, 3B ve bilgisayar destekli yapılmış kemik kesi kılavuzları tasarlanmaktadır. Ortopedik cerrahi kılavuzlar, cerrahi planlamanın, birebir uygulanmasını sağlayan, ameliyat sırasında oluşabilecek riskleri ortadan kaldırmak, ameliyat sürelerini kısaltmak ve operasyon başarısını arttırmak için tasarlanan ve üretilen genellikle polimer ve bazen de metalden üretilen rehber parçalarıdır (Şekil 6.34) [45].



Şekil 6.34. Ortopedik cerrahi kemik kesi kılavuz parçaları [45].

3B CAD model ile tasarlanan kemik kesi kılavuzları cerrahi müdahalede, vida ve protezleri yerleştirmek için en iyi konuma karar vermemizi sağlamaktadır (Şekil 6.35).

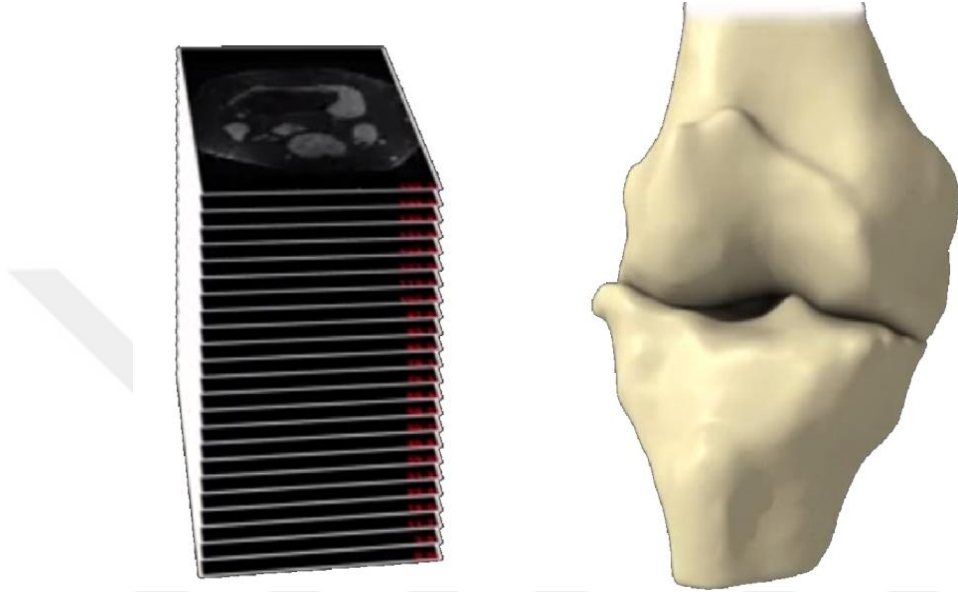


Şekil 6.35. Ortopedik cerrahi kılavuzun takılma doğruluğu OMNI [57]

Sanal cerrahi planlaması ile daha hassas kesi yapıldığı için daha az kemik doku kaybedilir. Kesi düzlemlerinin planlı yapılması neticesinde, kemik segmentleri arasında en geniş biçimde tam temas sağladığından, iyileşme, kemikleşme ve sıtabilite daha iyi olmaktadır. Ameliyat planlaması, hasta ameliyata alınmadan yapıldığı ve karşılaşılabilecek sorunların bir çoğu önceden öngörülebildiği için ameliyat süreleri kısaltmakta, hata oranı düşmekte ve başarı oranı artmaktadır [45].

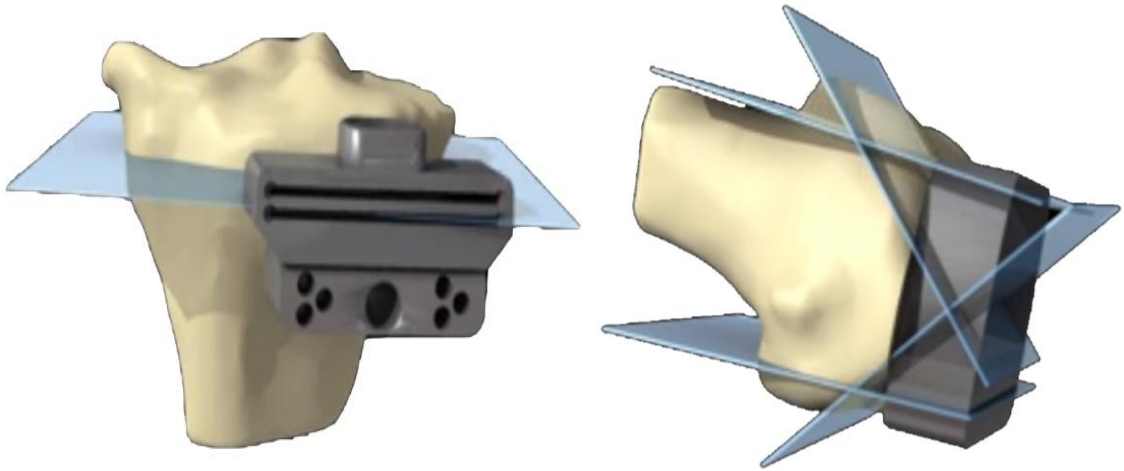
6.1.3. Sanal Cerrahinin Planlanması ve Örnek Uygulaması

Diz protezi takılacak bir hastanın uyluk (femur) ve kaval (tibia) kemiklerine ait bilgisayarlı tomografi görüntüsünden, Deneysel Çalışma 1'de olduğu gibi ilgili programlar ile 3B model formuna getirilmiştir (Şekil 6.36).



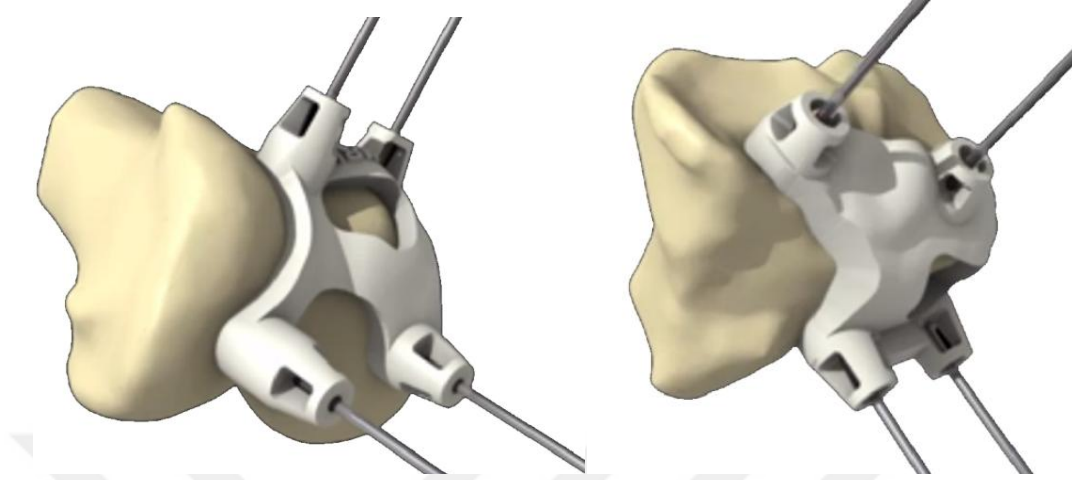
Şekil 6.36. Bilgisayarlı Tomografi görüntüden 3B model kemik dokusu elde edildi [58].

3B model üzerinden protezin en iyi konumda takılabilmesi kemik 3B datası üzerinde simülasyon edilerek, kemik üzerine takılması için gerekli vida, deliklerin pozisyonlarının en iyi açı ve düzlemleri belirlenmiştir (Şekil 6.37).



Şekil 6.37. Protez takılması için uygun kesi düzlem açılarının belirlenmesi [58].

Kesme açı düzlemlerinde kemik kesi işlemi yapabilmek için kemik kesi kılavuzları tasarlanmıştır (Şekil 6.38).



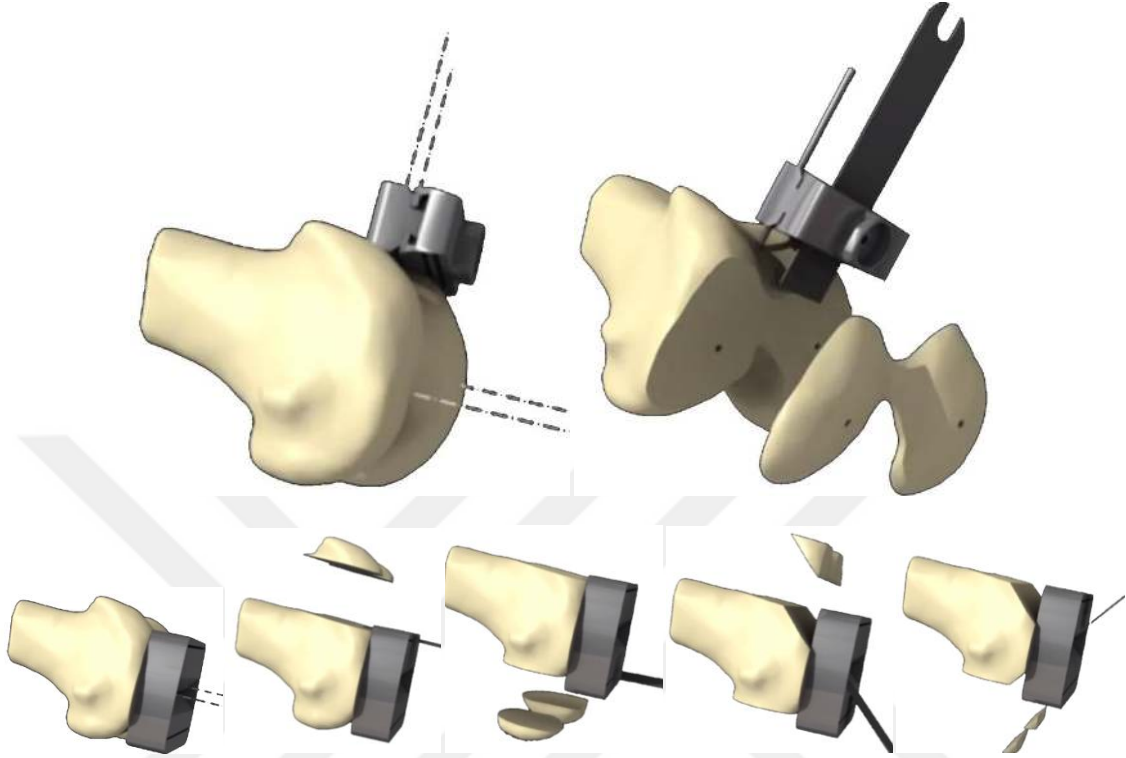
Şekil 6.38. Protez takılması için uygun tasarlanan kemik kesi kılavuzları [58].

Tasarlanan kemik kesi kılavuzları istenilen özelliklere göre üretilerek ilgili kısım cerrahi müdahale işlemine geçilmiştir. Cerrahi müdahalede önceden tespit edilen noktalara kemik kesi kılavuzlarından faydalanılarak sabitleme pimlerinin takılacağı delikler delinip, proteze uygun kesme açılarıyla belirlenen kemik kesi işlemleri için kesme plakası yerleştirilmiştir (Şekil 6.39).

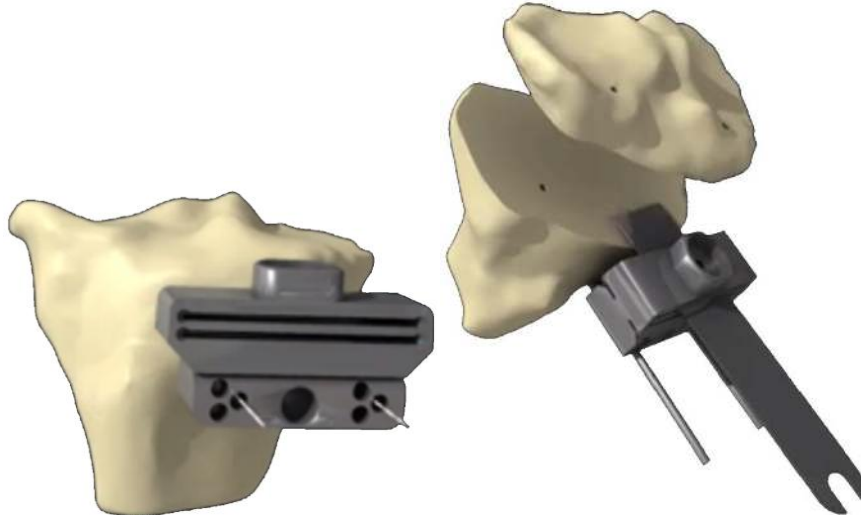


Şekil 6.39. Kemik kesi kılavuzunun takılması [59].

Kesme plakaları yardımıyla manüel olarak kemik kesi işlemi uyluk (femur) ve kaval (tibia) kemiklerine yapılmıştır (Şekil 6.40 ve Şekil 6.41).



Şekil 6.40. Femur (uyluk) kemiğinin kesi kılavuzları ile kesme plakasında kesilmesi [58].

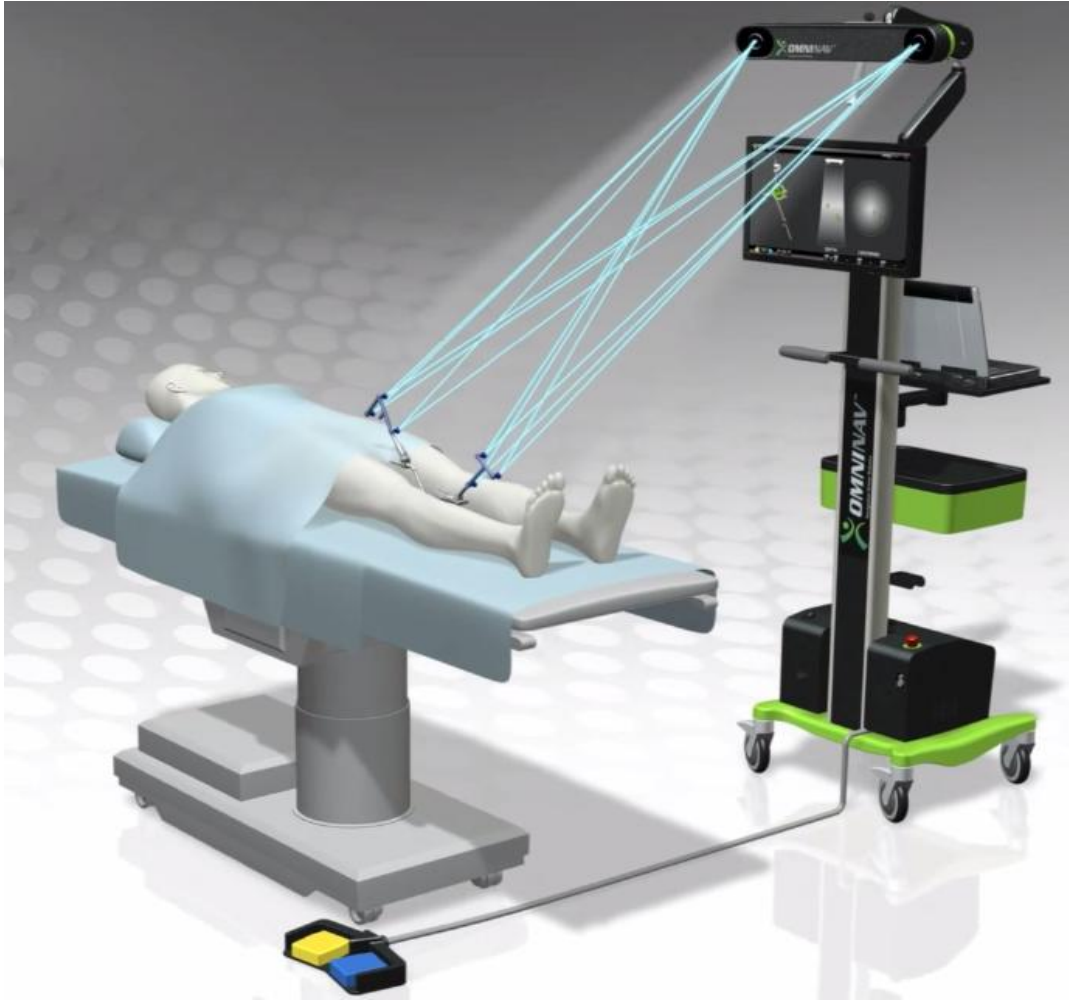


Şekil 6.41. Tibia (kaval) kemiğinin kesi kılavuzları ile kesme plakasında kesilmesi [58].

Cerrahi müdahale esnasında kesme plakaları yardımıyla kemik kesilerinin yapılması, ameliyatın kemik kesi işleminin istenilen açılarla hatasız yapılmasına, daha az kemik doku kaybıyla yapılmasına ve cerrahi müdahalenin daha kısa sürede bitirilmesi sağlanmıştır.

6.1.4. Robotik Cerrahinin Planlanması ve Örnek Uygulaması

Robotik cerrahisinde, manüel kemik kesi kılavuzları ve plakaları yerine motorlu, otomatik kontrollü olan kemik kesi kılavuz ve plakaları kullanılmıştır. Şekil 6.42'deki gibi navigasyon mantığı ile çalışan, tersine mühendislik uygulaması olarak temaslı veri toplama yöntemi ile veri toplanarak daha hassas kemik kesi işlemi yapılmıştır. Konumlanmanın daha hızlı olması nedeniyle ameliyat çok daha kısa sürede tamamlanmıştır.



Şekil 6.42. Robotik cerrahi ile ameliyat edilme yöntemi OMNIBotics [60].

Robotik cerrahide otomatik motorlu ve konumlu kesme kılavuzu olduğundan dolayı kesme kılavuz parçalar kullanılmamıştır. Cerrahi müdahale öncesinde kesme kılavuzları tasarlamaya ve üretmeye gerek kalmamıştır. Robotik cerrahi müdahalede, diz kapağı derisi üzerinde ameliyat kesisi açıldıktan sonra uyluk ve kaval kemikleri üzerinde önceden belirlenen 4 noktaya robotik konumlu kolların takılabilmesi için pim delikleri açılmıştır.

Robotik kolların kemik üzerinde açılan pim deliklerine takılmasıyla, uyluk ve kaval kemiklerinin birbirleri aralarındaki konum ve açısal pozisyonun robotik cihaz tarafından algılanması sağlanmıştır (Şekil 6.43).



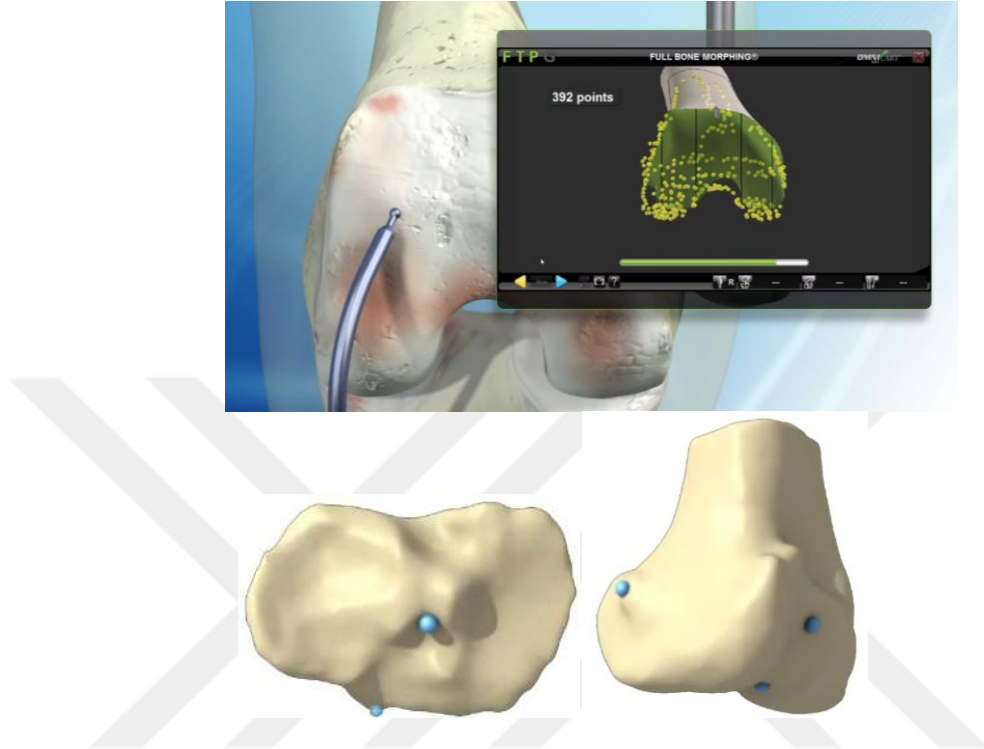
Şekil 6.43. Robotik cihaz ile kemik konumu algılayıcı robotik kolların takılması OMNIBotics [60].

Diz protezin takılmasında kemik kesilerinin uygun açılarla yapılabilmesi için kemik geometrisini tanımlaması yapılmıştır. Tanımlama, tersine mühendislikte temaslı veri toplama yöntemlerinden olan robotik cihaza bağlı bir probe uç yardımıyla kemik yüzeyine farklı noktalarda dokundurularak yapılmıştır (Şekil 6.44).



Şekil 6.44. Temaslı veri toplama yöntemi ile kemik geometrisinin tanımlanması MAKOpasty [61].

Cerrahi müdahale esnasında, robotik cihaz kemik geometrisini prob ucun yeterli sayıda dokunması sonrasında tanımlanmıştır. Tanımlama robotik cihaz monitöründen kontrol edilerek 426 adet dokunma sonrası tamamlanmıştır (Şekil 6.45).



Şekil 6.45. Kemik geometrisi tanımlamasının cihaz monitöründen kontrolü OMNIBotics [58, 60].

Robotik cihaz tanımlanan kemik geometrisi ve robotik kolların konumuna göre kemik kesi düzlemlerini otomatik olarak hesaplayıp analiz yaparak görüntü konsolundan kemik kesi düzlem ve açılarını göstermiştir (Şekil 6.46).



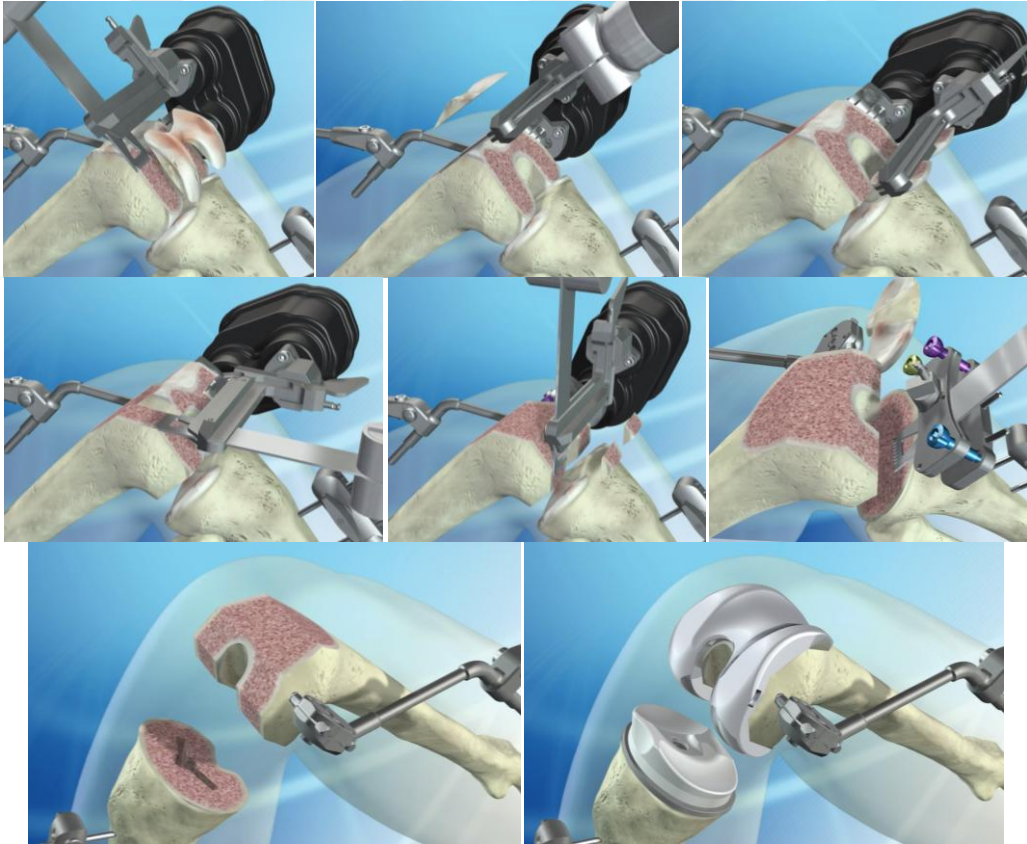
Şekil 6.46. Robotik cerrahide cihaz görüntü konsolu OMNIBotics [60].

Robotik cihazın hatalı olabilecek kemik kesi açılarını otomatik konum analizini görüntü konsolda göstermesiyle hatasız kesi açıları ile kesi işlemi yapılmıştır (Şekil 6.47).



Şekil 6.47. Robotik cerrahide cihaz görüntü konsolu kemik konum açısı OMNIBotics [60]

Robotik kola motorlu ve otomatik konumlu kesme kılavuzu takılarak kemik kesi işlemi yapılmış, diz protezi takılarak cerrahi müdahale bitirilmiştir (Şekil 6.48).



Şekil 6.48. Robotik cerrahide kemik kesi işlemi OMNIBotics [60]

6.2. Deneysel Çalışma 2

Bilgisayarlı tomografi formundaki görüntüyü 3B model formuna getirilip prototip olarak üretilmiş olduğu tahmin edilen insan bacağına ait Şekil 6.49'daki uyluk (femur) kemiğinin tersine mühendislik veri toplama yöntemlerinden temassız optik tarama sistemi kullanılarak 3B CAD model görünümü elde edildi.



Şekil 6.49. Prototip üretilmiş uyluk (femur) kemiği

6.2.1. 1. Aşama: Nokta Bulutu Forma Getirip, STL Formatta Kayıt Yapma

Uyluk (femur) kemiğinin 3B model görünümü elde edebilmek için, İnönü Üniversitesi, Malatya Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Alanında bulunan SmartSCAN marka kameralı optik tarama sistemi kullanıldı (Şekil 6.50).



Şekil 6.50. Optik tarama cihazı (Breuckmann SmartSCAN)

Tarama verilerini oluşturma ve sayısallaştırma programı olarak OPTOCAT ve RapidForm XOR programları kullanıldı (şekil 6.51).



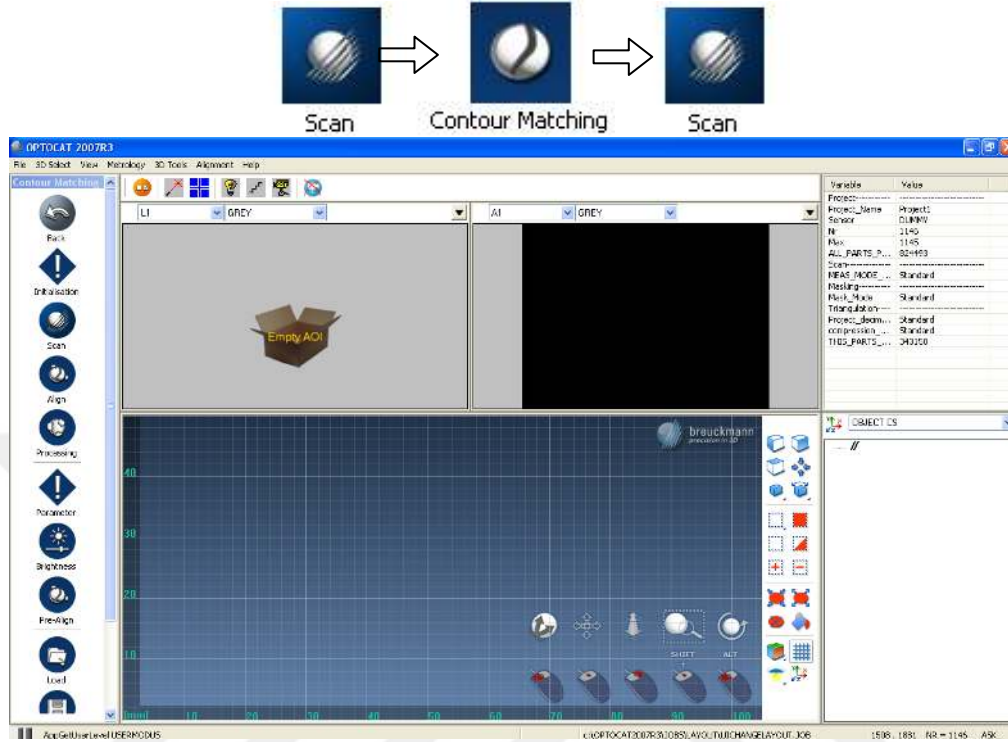
şekil 6.51. Tarama sistemi OPTOCAT programı ara yüzü

Tarama yapılan model ürün femur (uyluk) kemiği kameranın görüş alanında olacak bir konumda tarama sehpasının üstüne konuldu (şekil 6.52).



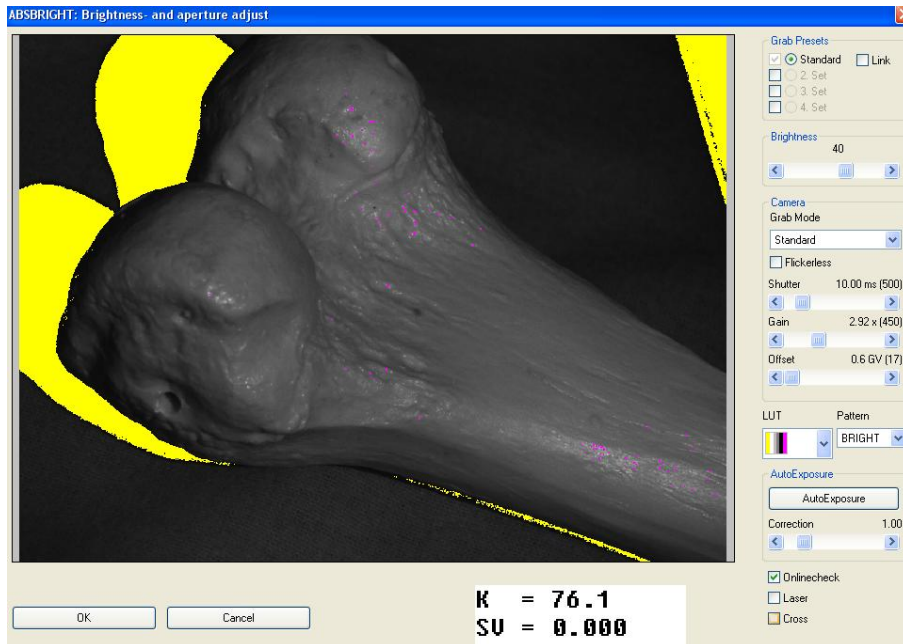
şekil 6.52. Model ürünün tarama sehpasına konulması (Breuckmann SmartSCAN)

OPTOCAT programında optik taramayı başlatmak için yüzey geometri taraması olan Scan-Contour Matching-Scan ikonları seçildi (Şekil 6.53).



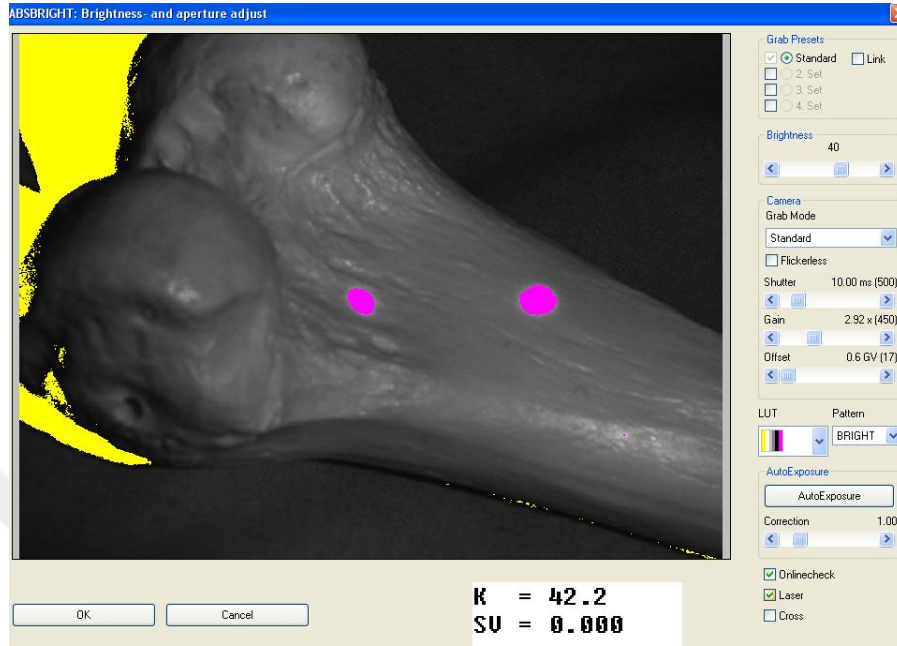
Şekil 6.53. Model ürün taraması yapılacak program ara yüzü

Scan ikonu ile Brightness-and Aperture Adjust diyalog kutusu açıldı (Şekil 6.54).



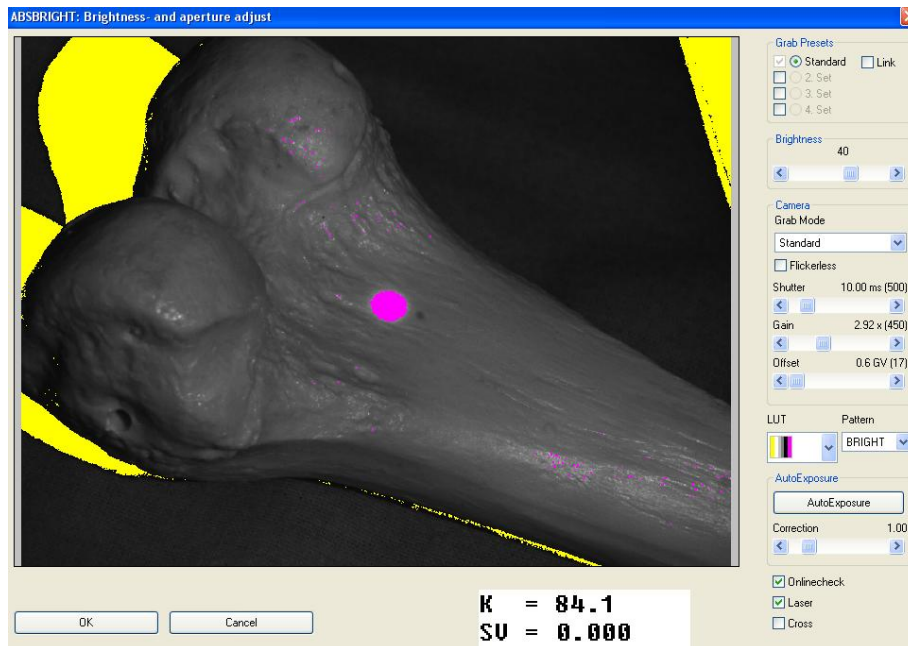
Şekil 6.54. ABSBRIGHT Brightness-and Aperture Adjust diyalog kutusu

Laser onay ikonu seçili hale getirilerek 2 adet olan lazer ışının model ürünün üzerindeki çarpma noktalarının görülmesi sağlandı (Şekil 6.55).



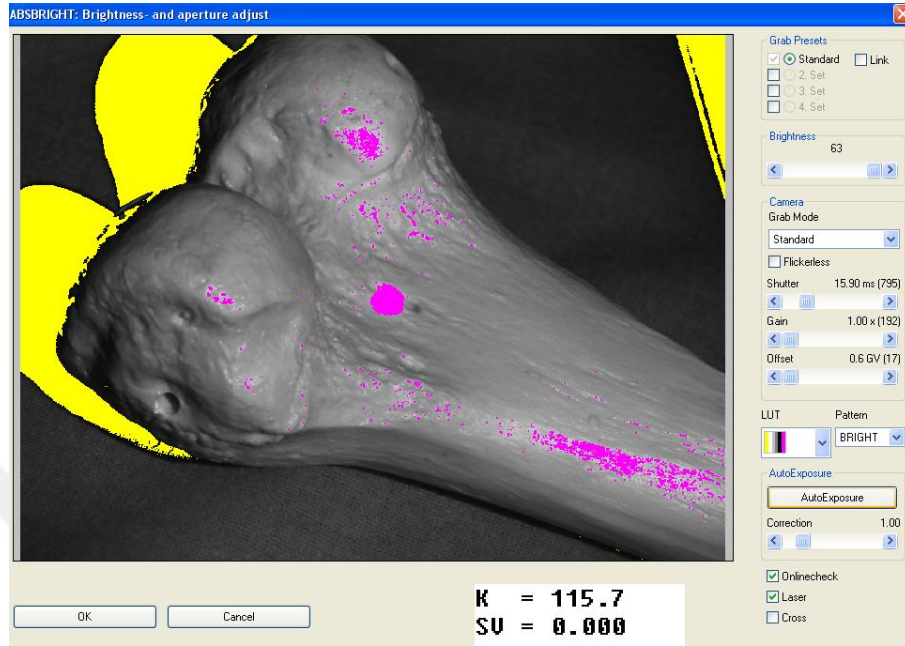
Şekil 6.55. Lazer ışınlarının model ürün üzerinden yansımaları

Model ürünü veya kamerayı hareket ettirmek suretiyle lazer ışınlarının birbirleri üzerine denk gelmeleri sağlandı. Böylelikle yapılacak taramada en üst düzeyde tarama verisi için optimum tarama uzaklığını olan 84.1cm olarak elde edildi (Şekil 6.56).



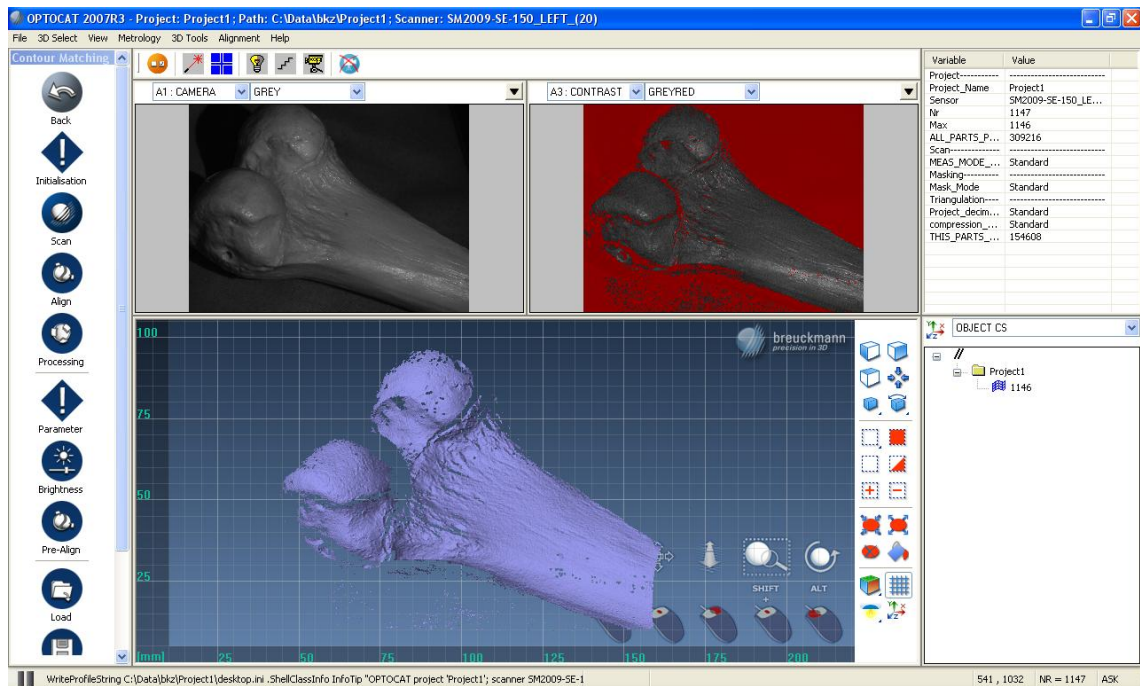
Şekil 6.56. Lazer ışınlarının birbirleri üzerine denk getirilmesi

AutoExposure ikonunu seçilerek renk ve ışık ayarı otomatik yapıldı. Taramada en yüksek oranda nokta bulutu formda yüzey geometri verisi elde edildi (Şekil 6.57).



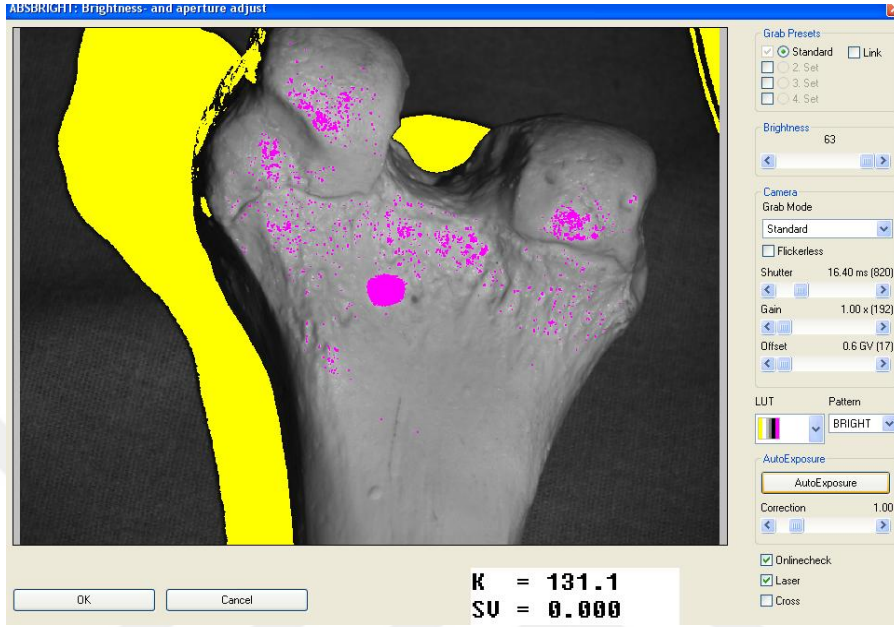
Şekil 6.57. AutoExposure ikonu seçimi

OK ikonu seçilerek ilk tarama yapıldı ve 154.608 adet noktadan oluşan nokta bulutu formda tarama verisi direkt olarak görüntüye yansıdı (Şekil 6.58).



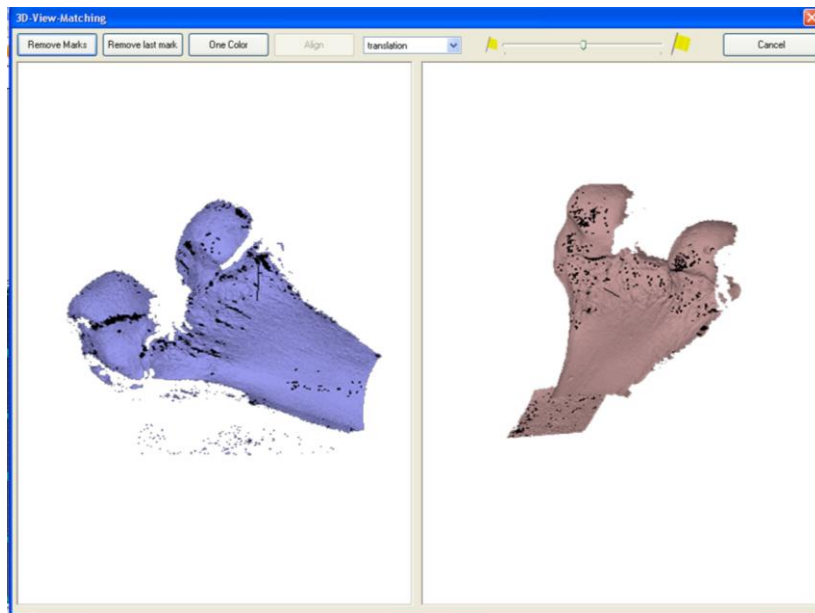
Şekil 6.58. İlk taramada elde edilen nokta bulutu formda veri

Model ürün yeni tarama için tabla üzerinde farklı bir durma pozisyonuna getirildi. Scan ikonu seçildikten sonra ilk taramada olduğu gibi Lazer ve AutoExposure ayarlamaları yapıldı. OK ikonunu seçilerek ikinci tarama yapıldı. (Şekil 6.59).



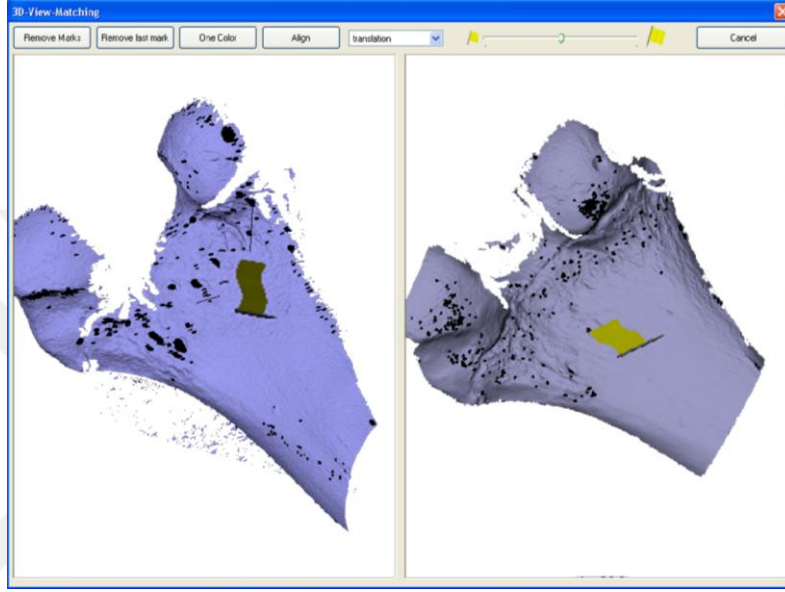
Şekil 6.59. Model ürünün konumunun değiştirilerek ikinci taramanın yapılması

Birinci taramada açılmayan, ikinci ve sonraki tüm taramalarda açılan 3D-View Matching diyalog kutusunda soldaki görselde bir önceki tarama nokta bulutu yüzey verisi ile sağdaki görselde yeni tarama yüzey verileri eşleştirmeleri yapıldı (Şekil 6.60).



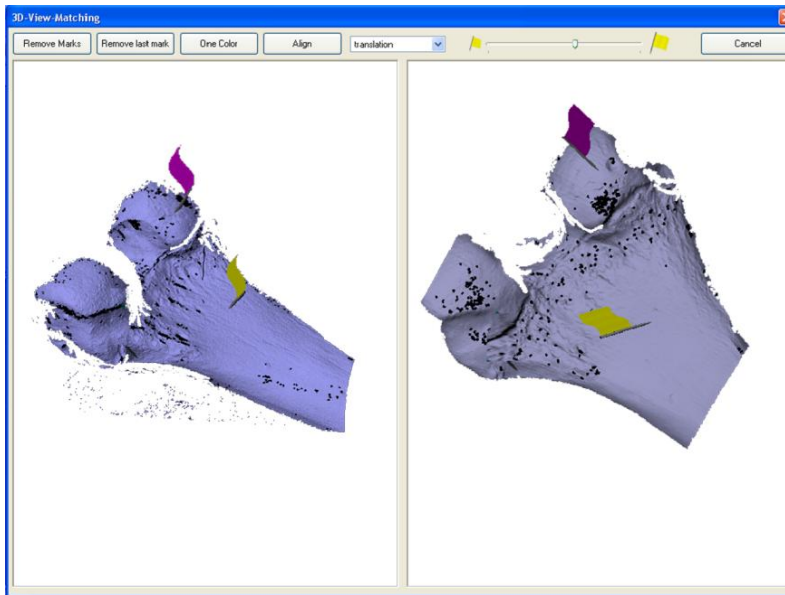
Şekil 6.60. 3D View Matching diyalog kutusu ile yüzey eşleştirmenin yapılması

Yüzey eşleştirmeleri en az üç yüzeyin eşleştirme ile yapılması nedeniyle üç adet eşleştirme yapıldı. Birinci eşleştirmede sol görseldeki nokta bulutu yüzey verisi üzerinde klavyede CTRL tuşuna basılı tutularak seçilen noktaya sarı renk bayrak (mark) yerleştirilmesi ile sağ görselde nokta bulutu yüzey verisine eş gelebilecek noktaya yine klavyede CTRL tuşu basılı tutularak seçilen noktaya sarı renk bayrak (mark) yerleştirilmesi ile eşleştirme yapıldı (Şekil 6.61).



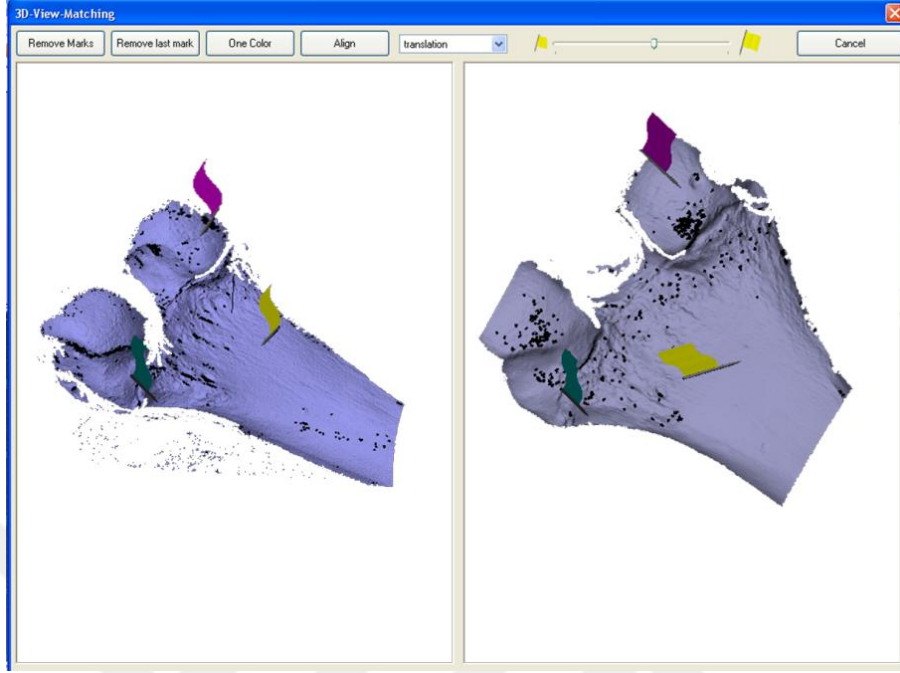
Şekil 6.61. Sarı renk bayrak (mark) ile birinci yüzey eşleştirme işleminin yapılması

İkinci eşleştirmede mor renk bayrak ile yüzey eşleştirme yapıldı (Şekil 6.62).



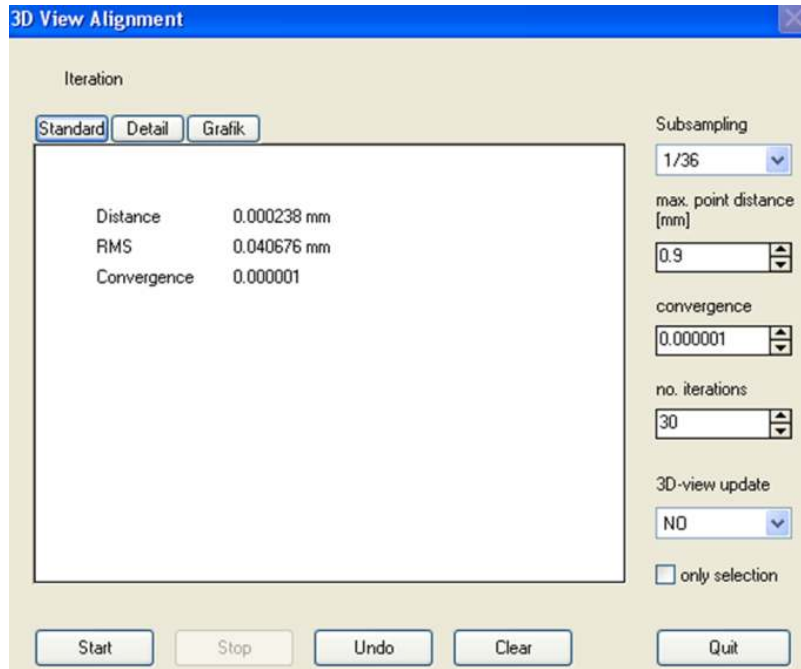
Şekil 6.62. Mor renk bayrak (mark) ile ikinci yüzey eşleştirme işleminin yapılması

Üçüncü eşleştirmede yeşil renk bayrak ile yüzey eşleştirme yapıldı (Şekil 6.63).



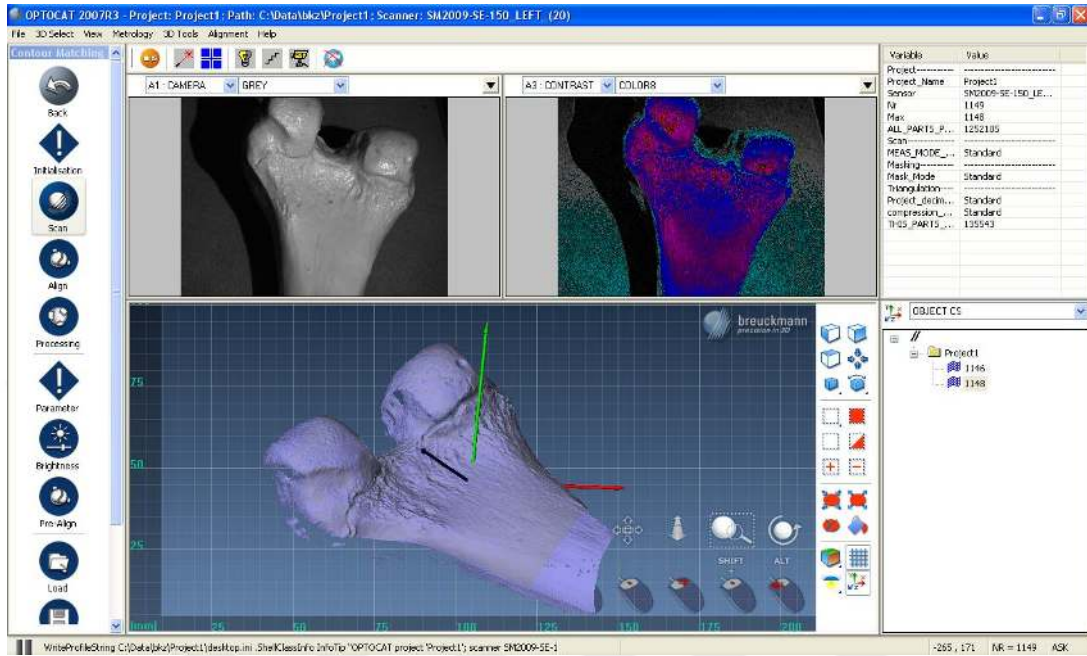
Şekil 6.63. Yeşil renk bayrak (mark) ile üçüncü yüzey eşleştirme işleminin yapılması

OK ikonu seçilerek yüzey eşleştirme tamamlandı. 3D View Aligment diyalog kutusu açıldı. 3D View Aligment diyalog kutusunda yüzey birleştirme sapma analizi değeri olarak RMS 0.040676 mm, yani yaklaşık 40 mikronluk bir sapma değeri oluştu (Şekil 6.64).



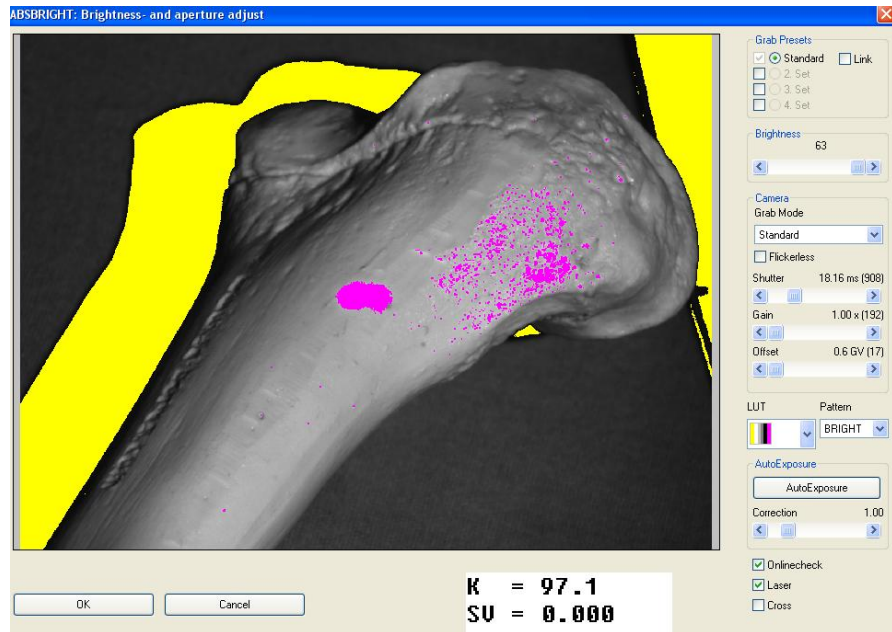
Şekil 6.64. 3D View Aligment diyalog kutusu

Yüzey eşleştirmeler yapıldıktan sonra ikinci tarama 135.543 yüzeyde noktadan oluşan nokta bulutu verisi ile önceki nokta bulutu verilerini birleştirerek yeni oluşan model ürün 3B yüzey nokta bulutu verisini gösterdi (Şekil 6.65).



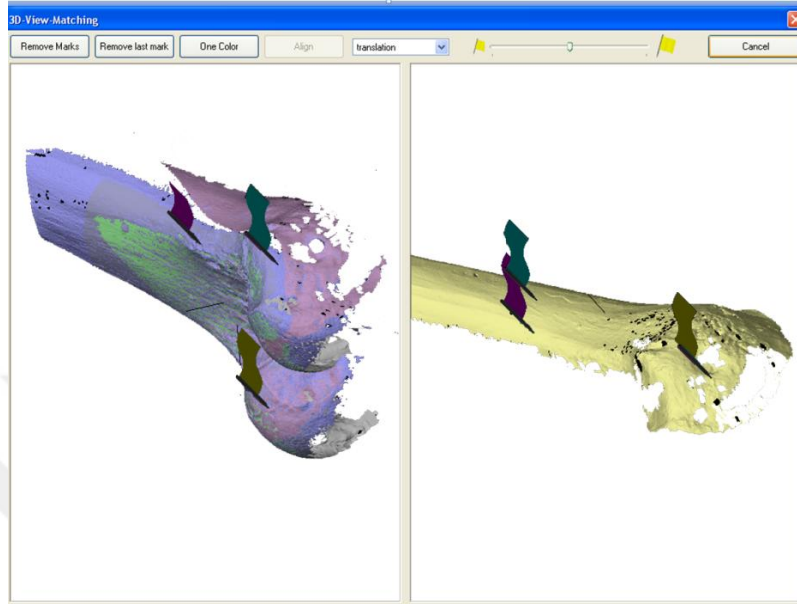
Şekil 6.65. Model ürünün nokta bulutu verisinden yüzey eşleştirme yapılan hali

Model ürünün tabla üzerindeki duruş pozisyonunu değiştirilip Scan ikonunu tekrar seçilerek model ürünün diğer yüzeylerinin taramaları yapıldı (Şekil 6.66).



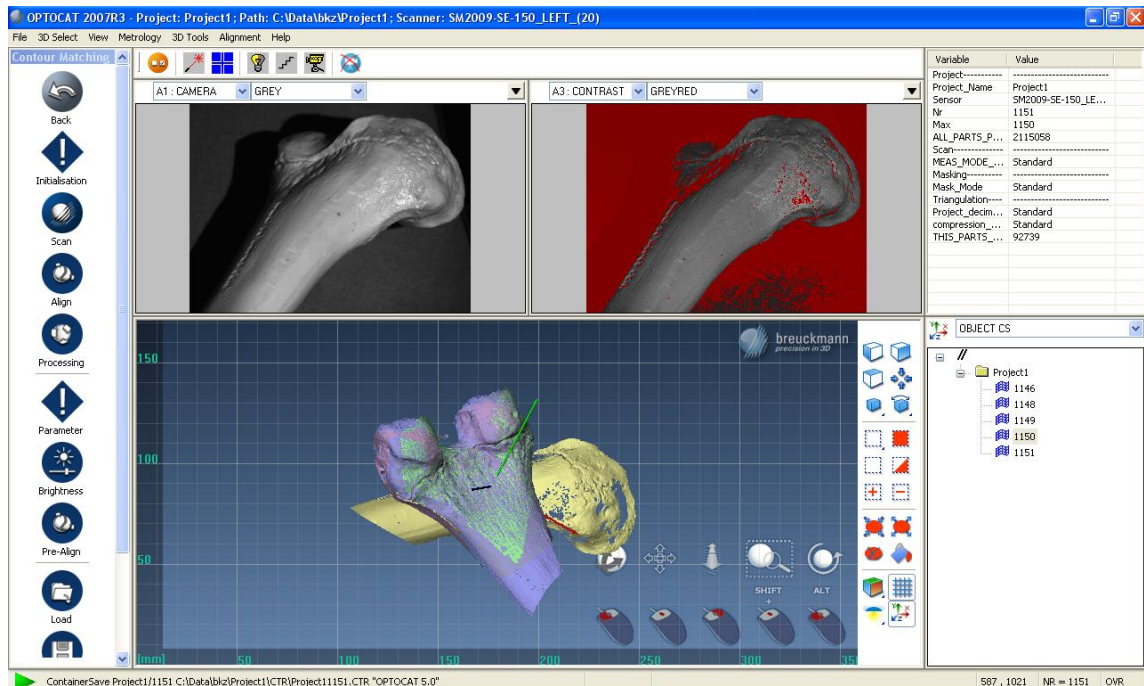
Şekil 6.66. Model ürünün duruş pozisyonunun değiştirilerek yeni tarama yapılması

Yüzey eşleştirmelerinde bayrak (mark) seçimlerini birbirleriyle eşleştirecek şekilde doğru konumda kullanılması gerekir. Yanlış kullanımlara karşı Remove last mark ve Remove Marks ikonları kullanıldı (Şekil 6.67).



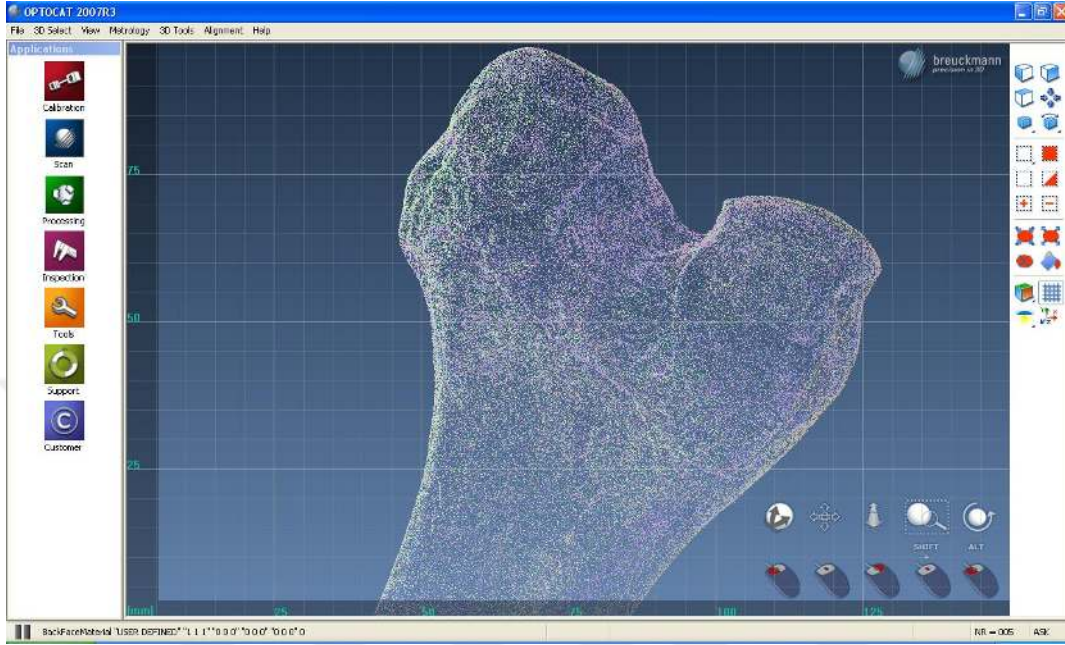
Şekil 6.67. Yeni taramalarda hatalı yüzey mark bayrak seçimi

Yüzey eşleştirmelerinde hatalı bayrak (mark) nokta seçimlerinde oluşan 3B model nokta bulutu verisi doğru konumda olmamıştır (Şekil 6.68).



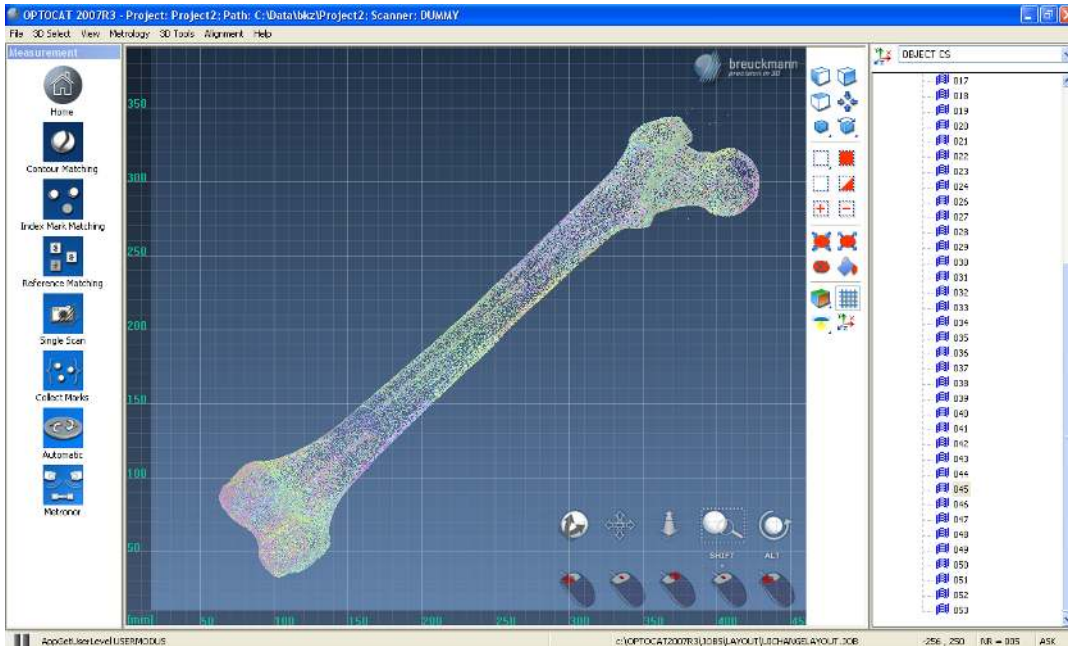
Şekil 6.68. Hatalı bayrak (mark) nokta seçimlerinde oluşan hatalı nokta bulutu verisi

Model ürünü her taramada duruş pozisyonunu değiştirmek suretiyle, bir önceki oluşan 3B model yüzey geometrisiyle eşleştirme yaparak 3B nokta bulutu formunda yüzey geometrisi verisi elde edildi (Şekil 6.69).



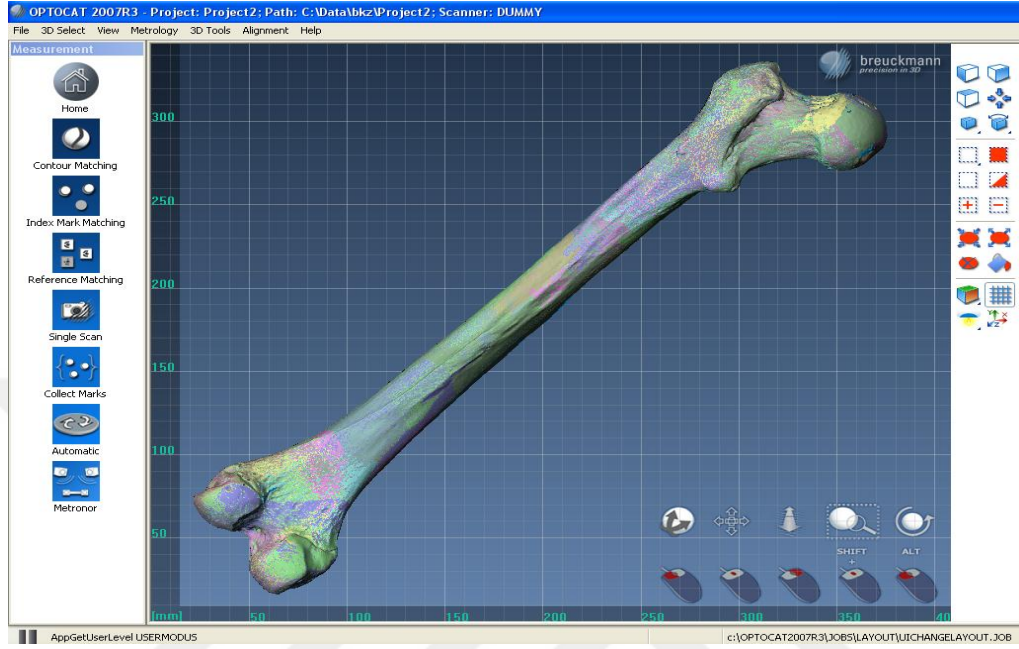
Şekil 6.69. Model ürün nokta bulutu formunda 3b geometri verisi

Model ürünün uyluk (femur) kemiğinin nokta bulutu formunda tam olarak 3B yüzey geometrisi 53 adet taramanın yapılması sonucunda oluştu (Şekil 6.70).



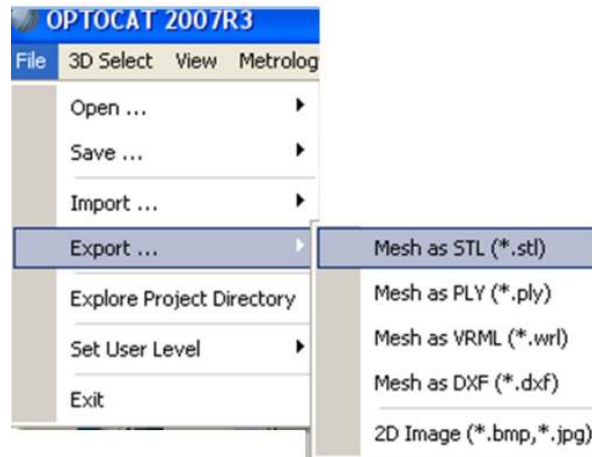
Şekil 6.70. Model ürünün 53 adet tarama sonucunda nokta bulutu formda oluşan görüntüsü

Elde edilen 3B nokta bulutu yüzey geometri verisi OPTOCAT programı tarafından yüzey formu ile gösterebilmesine rağmen, yüzeyinin surface yani katı yüzey olmaması nedeniyle 3B CAD modellemede şu aşamada kullanılamamıştır (Şekil 6.71).



Şekil 6.71. Model ürün tarama sonrası yüzey formlu görünümü

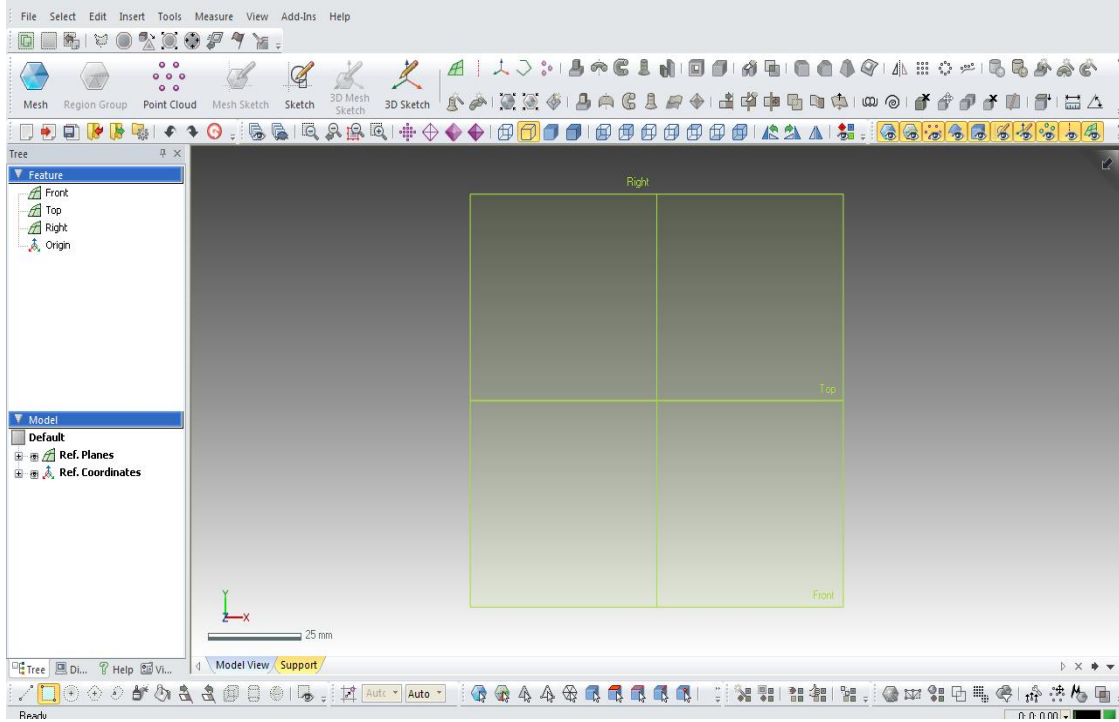
Model ürün uyluk (femur) kemiği nokta bulutu yüzey geometri verisinden faydalanaarak 3B modelleme ve tasarımlar yapabilmek için nokta bulutu formunun katı model yüzey olması gereklidir. Bu işlem için tarama işlemi verisi File-Export sekmesinden STL uzantılı olarak kayıt yapıldı (Şekil 6.72).



Şekil 6.72. STL formatta kayıt yapma

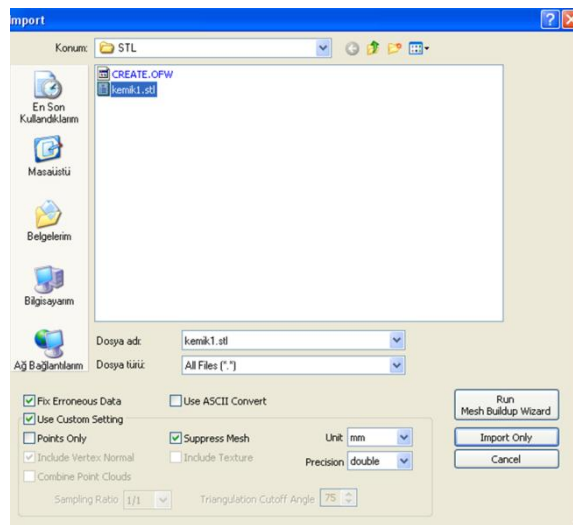
6.2.2. 2. Aşama STL Formatındaki Dosyayı CAD Formatında Kayıt Yapma

STL formatında kayıt yapılan uyluk (femur) kemiğine ait nokta bulutu veri dosyasını CAD formatında kayıt yapmak için RapidForm XOR programı kullanıldı (Şekil 6.73).



Şekil 6.73. RapidForm XOR programı ara yüzü

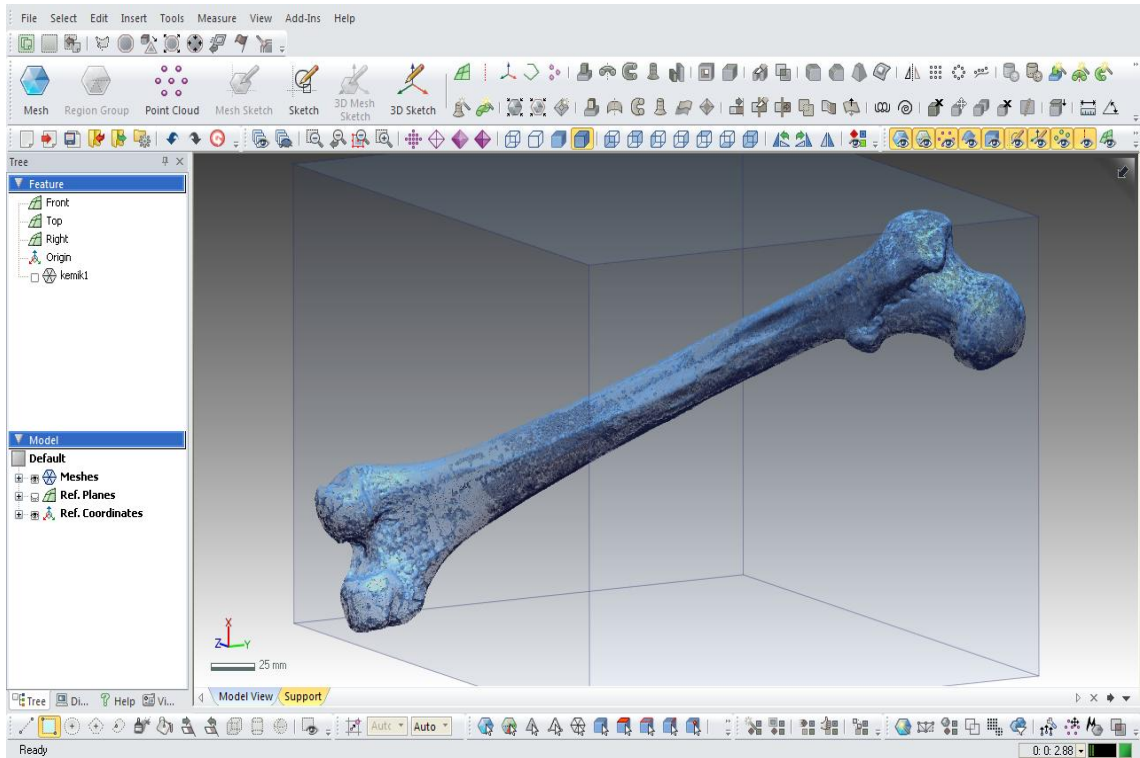
İnsert menüsü İmport sekmesinden STL formatındaki ilgili nokta bulutu formundaki kayıtlı dosya seçilerek açıldı (Şekil 6.74 ve Şekil 6.75).



Şekil 6.74. İnsert-İmport sekmesinden STL formatındaki kayıtlı dosyayı açma

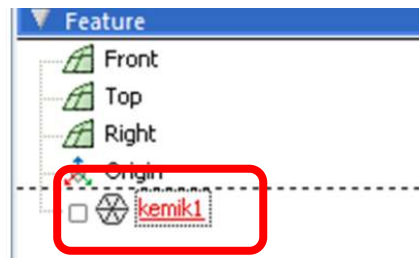
İmport edilerek açılan dosya nokta bulutu formunda olduğu için katı model düzenleme ve çizim komutlarının hepsi pasif durumdadır. Model ürün formatının katı yüzey formuna getirildiği zaman katı model düzenleme komutları pasif durumdan aktif duruma geçerek istenilen modelleme ve tasarımlar yapılmaktadır.

Kemik dokusu ve geometrik yapısı gereği çizgisel olarak çizilemeyeceği ve formunun free yani düzlemsel yüzeylerden oluşmaması nedeniyle direkt olarak olduğu haliyle 3B CAD model haline getirmemiz daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.



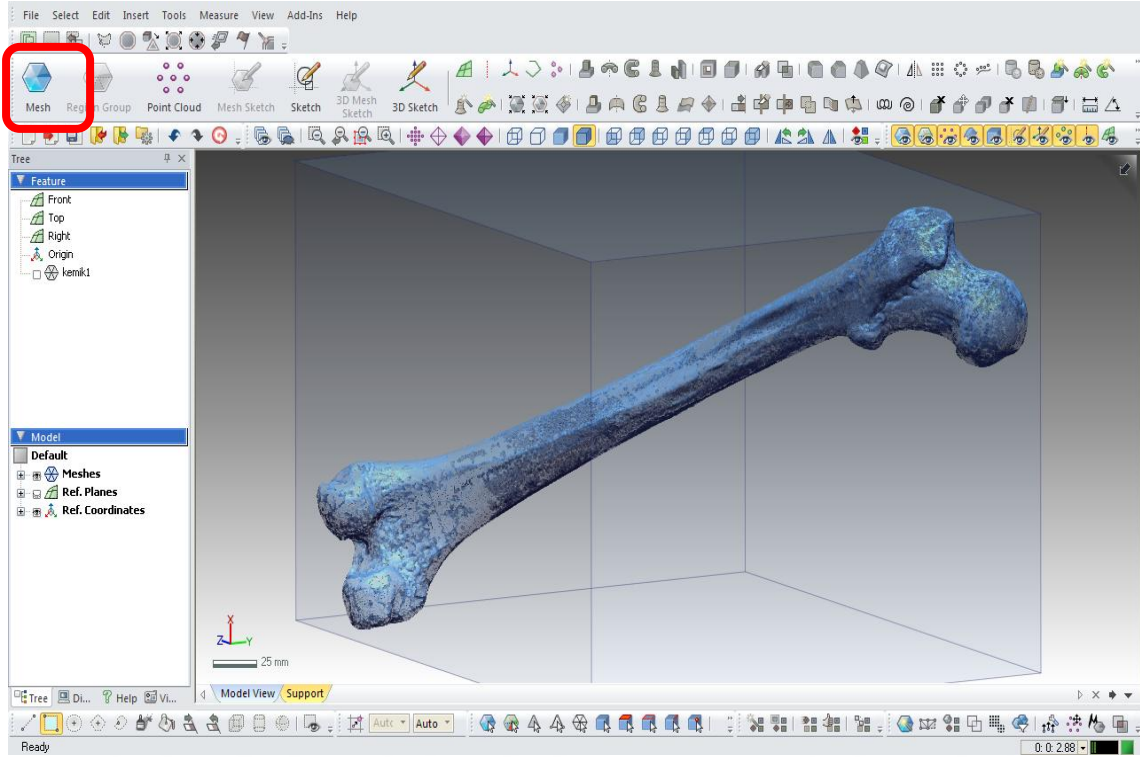
Şekil 6.75. İmport edilen dosya

Feature işlem ağacı sekmesinin içinde dosya adı yazılı ikon seçimi yapıldı. Böylece programda yapılan işlemlerin seçili öğeye uygulanması sağlandı (Şekil 6.76).



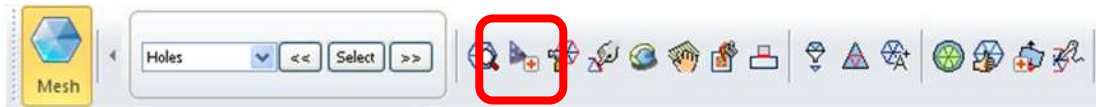
Şekil 6.76. İşlem Ağacında (Feature) İşlem Yapmadan Önce Seçim Yapma

İşlem ağacından nesneyi seçtikten sonra Mesh sekmesi seçildi. Mesh sekmesi geometri formundaki yüzey üzerinde bulunan noktaları belli bir düzen içerisinde fazlalık ve azlıklardan arındırarak daha düzenli bir katı yüzey elde edildi (Şekil 6.77).



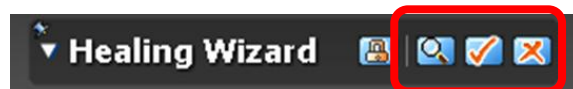
Şekil 6.77. Mesh sekmesi seçimi mesh seçenekleri

Yüzey formu çok düzenli ve düzlemsel yüzeylerden oluşmadığı için direkt olarak Healing Wizard ile hızlı yüzey düzenleme sekmesi seçildi (Şekil 6.78).



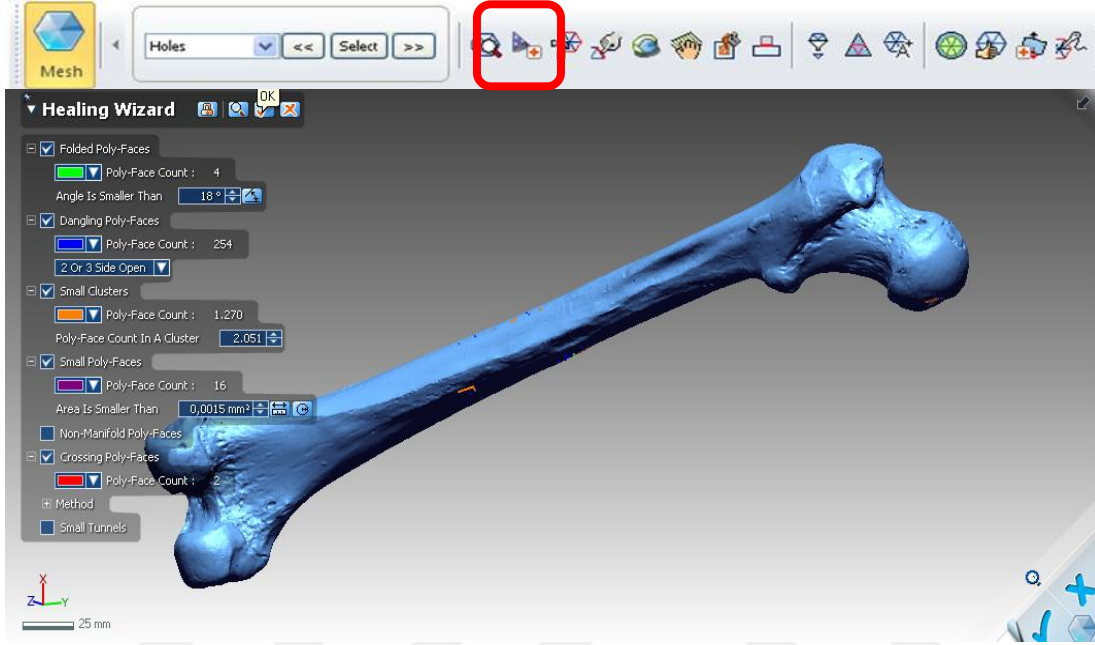
Şekil 6.78. Mesh seçeneklerinden Healing Wizard

Herhangi bir özellik seçildiği zaman o seçili özellikleri ekran içinde listelenir. Seçim içinde büyüteç şeklindeki görüntü yapılan işlemin öncelikle bir ön izlemesini görmemizi sağlar. Onay ikonu ise seçili komut işlevinin, uygulanması sağlandı (Şekil 6.79).



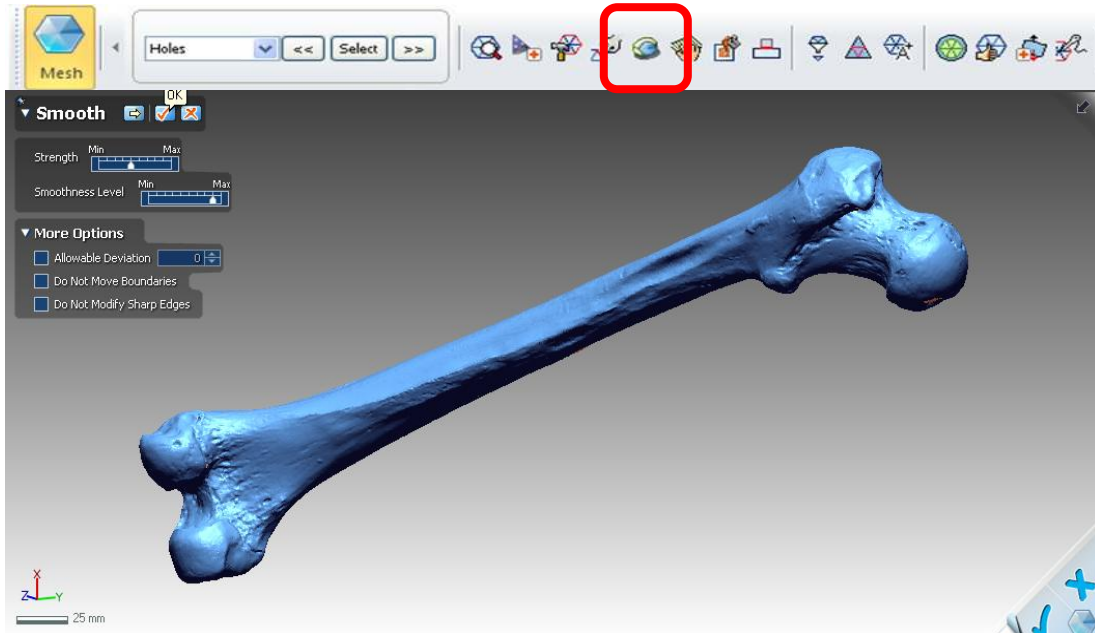
Şekil 6.79. Sekme önizleme ve onay sekmeleri

Healing Wizard sekmesi, nokta bulutu yüzeyinde olan hatalı, ters dönmüş ve birbirini takip etmeyen formdaki yüzeyleri iyileştirmeler yaparak onardı. Form yapısı stabil olmadığı için değerlerinde, değişiklik yapılmadan onaylanmıştır. Onarım yaptıktan sonra model ürün yüzeyinde renklendirme yapmıştır (Şekil 6.80).



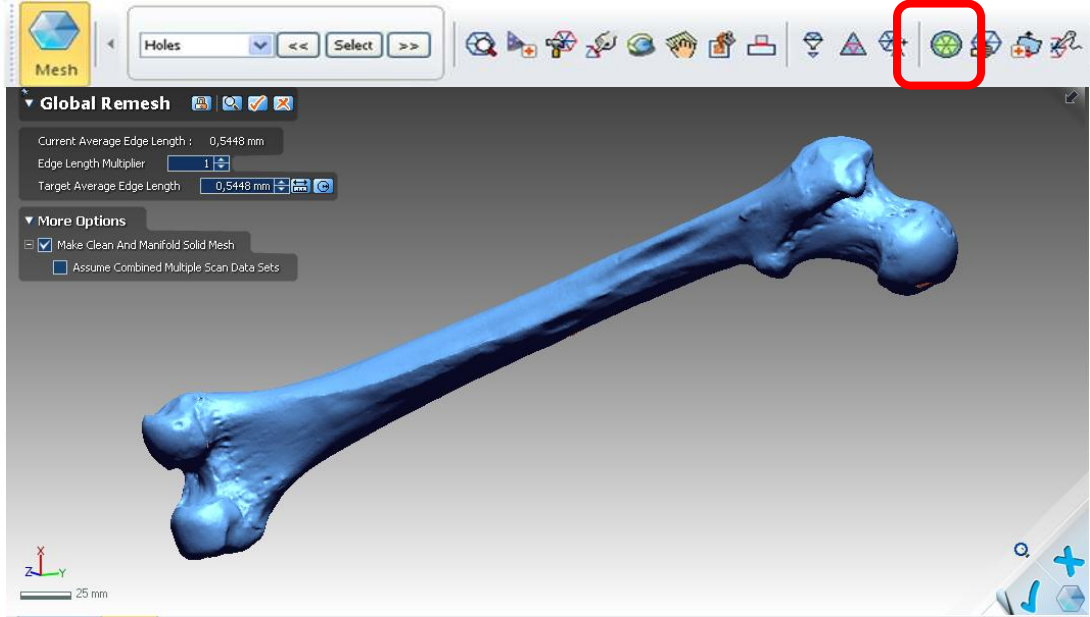
Şekil 6.80. Healing Wizard sekmesi

Smooth sekmesi seçilerek pürüzsüz ve düz bir yüzey oluşumu sağlandı (Şekil 6.81).



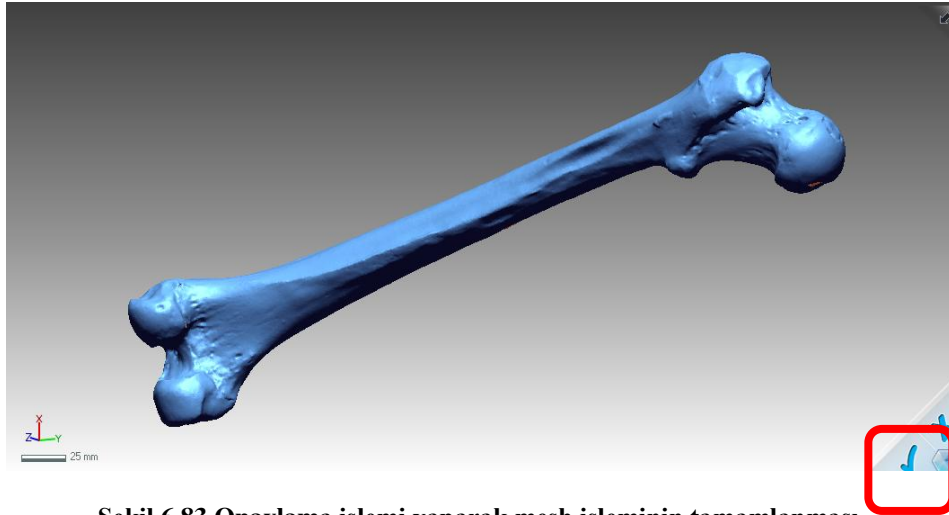
Şekil 6.81. Smooth sekmesi

Global Remesh sekmesi seçilerek yüzeydeki düzgünsüz oluşumları otomatik olarak temizleyip, açık yüzeyleri kapatarak, katı yüzey hacim haline getirildi (Şekil 6.82).



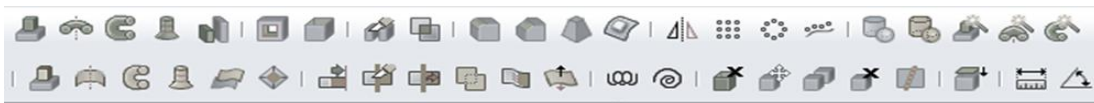
Şekil 6.82. Global Remesh sekmesi

Mesh işlemleri tamamlandıktan sonra onay ikonu seçildi (Şekil 6.83).



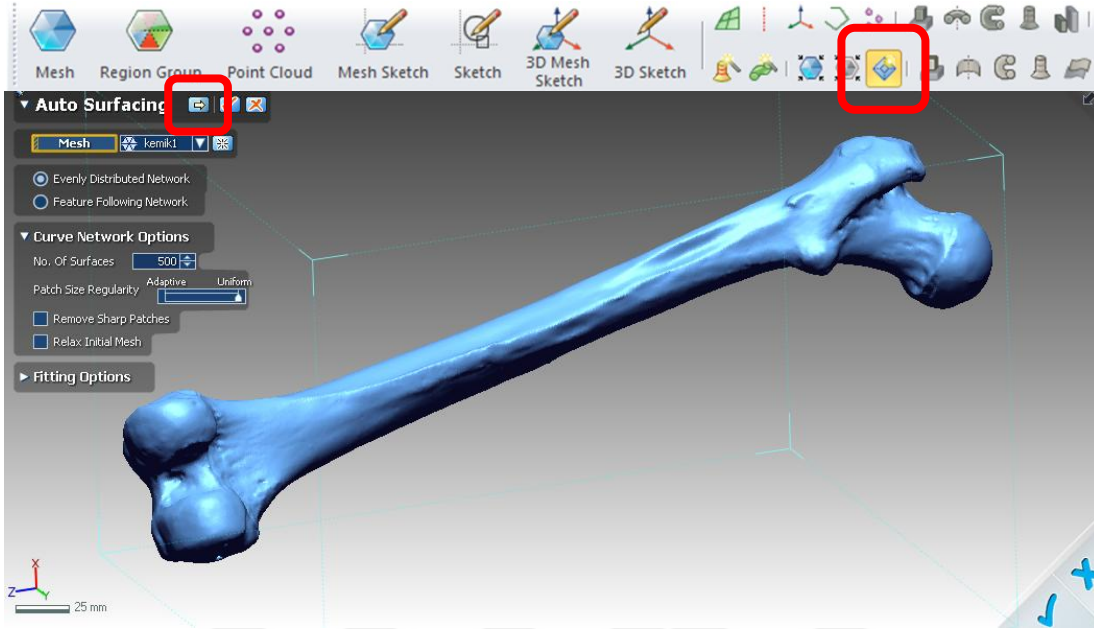
Şekil 6.83. Onaylama işlemi yaparak mesh işleminin tamamlanması

Mesh işleminde, yüzey katı olmadığı için katı model komutları pasiftir (Şekil 6.84).



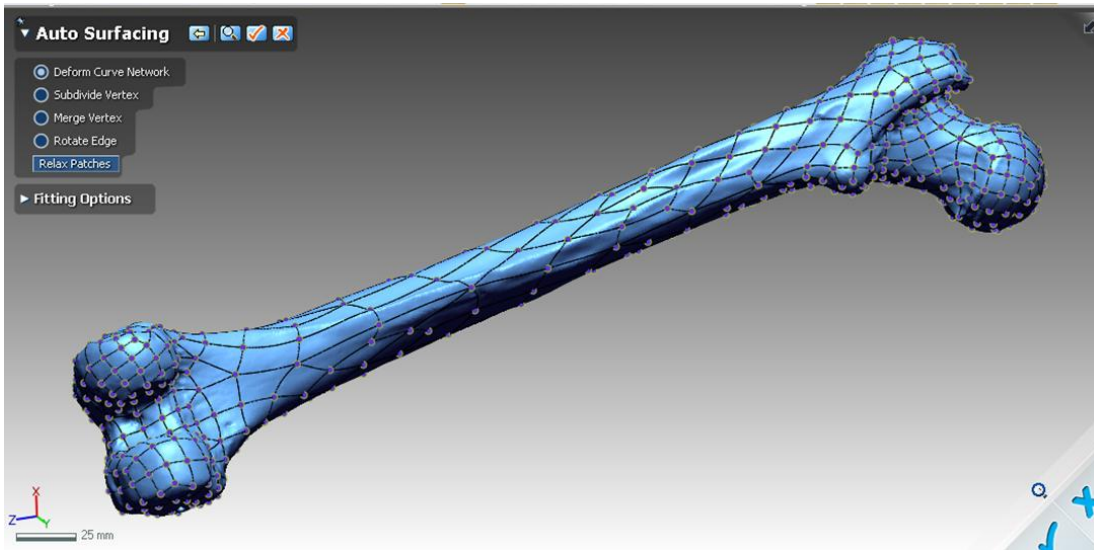
Şekil 6.84. Yüzeyin surface yani katı olmadığı için pasif katı model komutları

Auto Surfacing sekmesi seçilerek model ürün yüzeyini kaplama ile kapatarak katı yüzey oluşturdu. İleri sekmesi seçilerek surface kaplamanın ikinci aşamasına geçildi (Şekil 6.85).



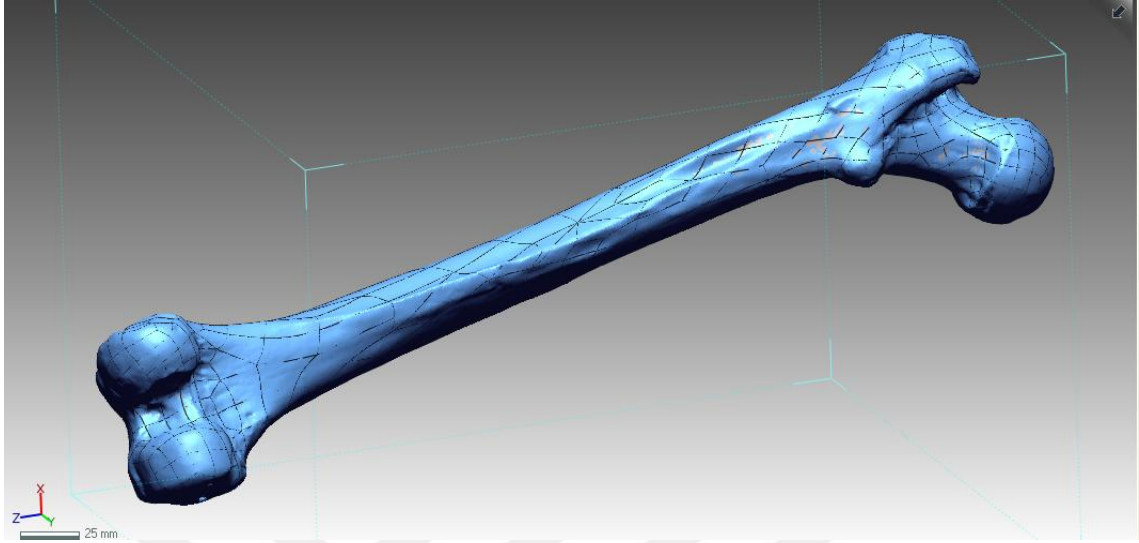
Şekil 6.85. Auto Surfacing sekmesi

Auto Surfacing sekmesinin birinci seçeneği olan Evenly Distributed Network Sistemi ile Mesh yüzeyine rastgele yamuklar şeklinde yüzey ağı ile kaplayarak katı yüzeyler oluşturuldu. Deform Curve Network, Subdivide Vertex, Merge Vertex ve Rotate Edge seçenekleri ile yüzey ağının formunda çizgisel değişiklikler yapıldı (Şekil 6.86).



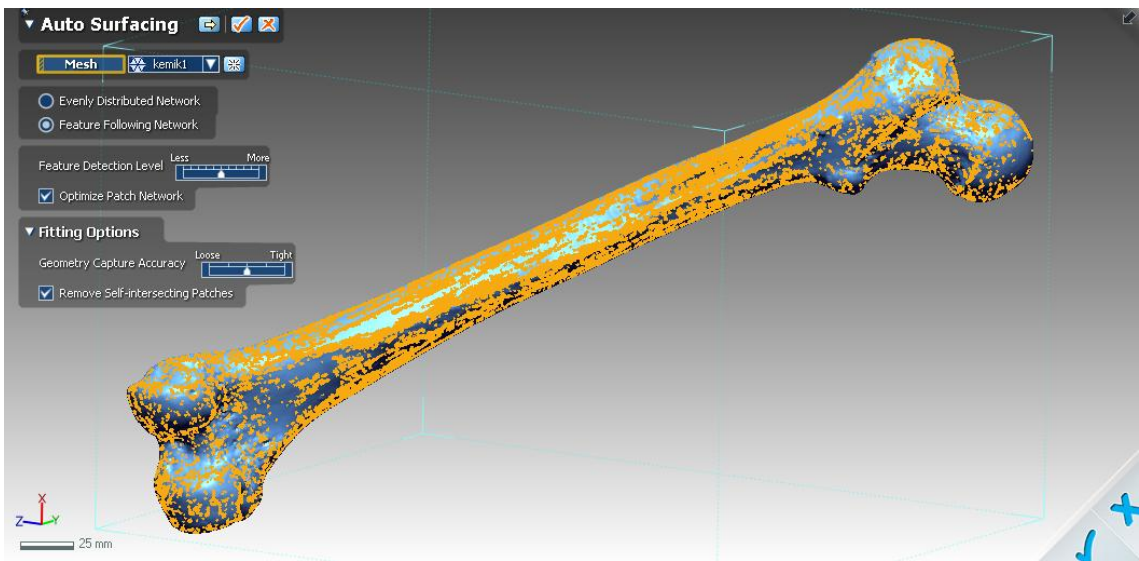
Şekil 6.86. Evenly Distributed Network sistemi ile yüzey ağı oluşturma

Yüzey formu stabil olmadığı için yüzey düzenlemesi yapmaya gerek duymadan direkt olarak surface ile katı yüzey kaplandı (Şekil 6.87).



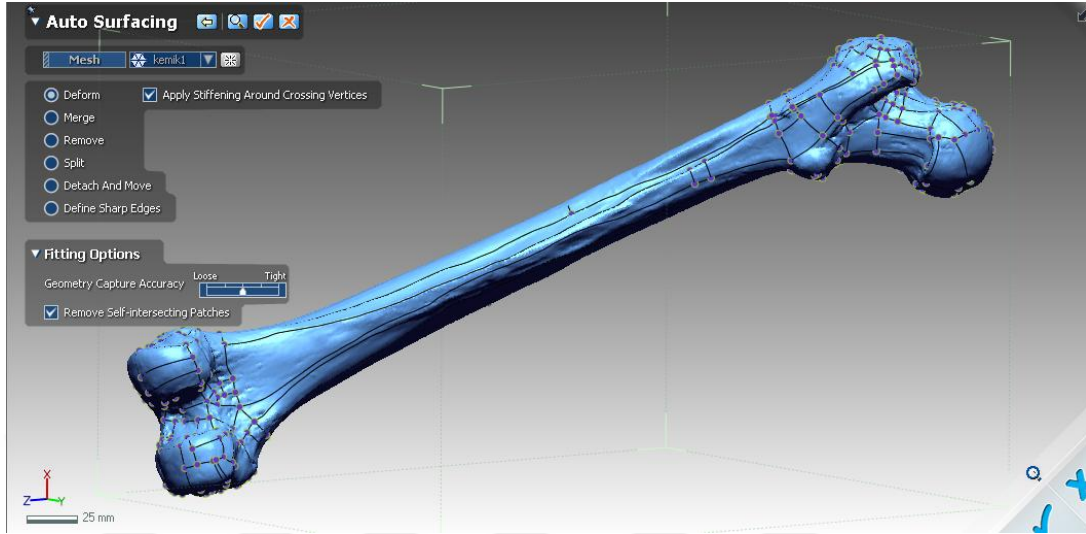
Şekil 6.87. Evenly Distributed Network sistemi ile katı yüzey oluşturma

Auto Surfacing sekmesinin ikinci seçeneği Feature Following Network'dur. Bu seçenek ile katı yüzey kaplama yapıldığında ağ çizgileri daha uzun ve daha kullanışlı yüzey geometrisi formu ile kaplama yapıldı. Yüzey geometri ağının Feature Detection Level seçeneğinde yüzey ağı formunu büyüklüğü Less-More sıklasına göre ayarlandı. Optimize Patch Network ile yüzey geometrisi ağının genellikle dört veya üç kenar yamuk formda otomatik olarak yapması sağlandı (Şekil 6.88).



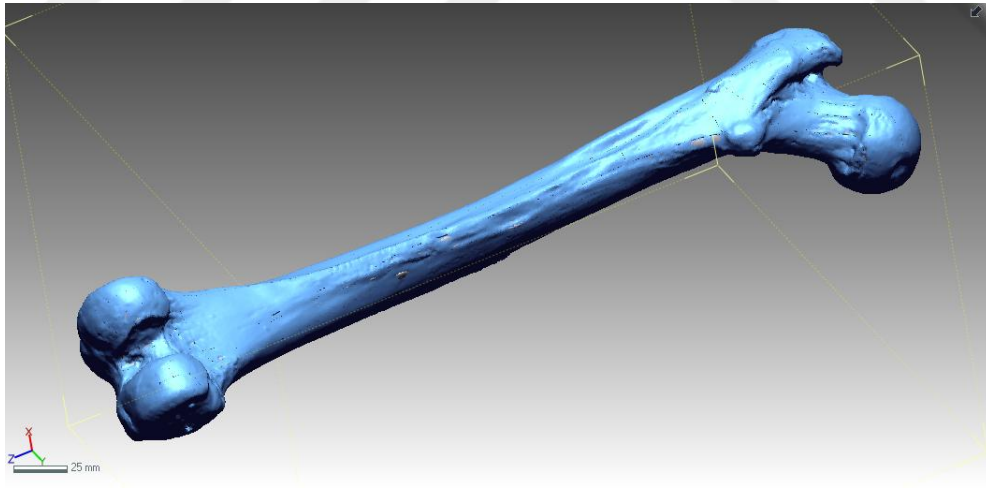
Şekil 6.88. Feature Following Network sistemi ile yüzey ağı oluşturma

Yüzey formu stabil olmadığı için yüzey düzenlemesi yapmaya gerek duyulmadı. Yüzey ağı formunda taşıma, çoğaltma ve yer değiştirme gibi değişiklikler yapıldı (Şekil 6.89).



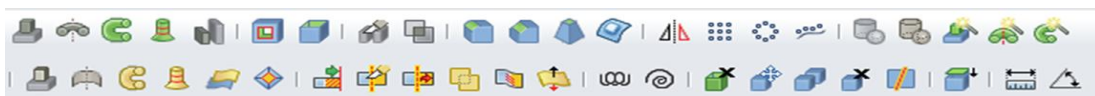
Şekil 6.89. Feature Following Network sistemi ile yüzey ağı ve düzenlemesi

Auto Surfacing yaptıktan sonra geometrik yüzey katı yüzey kaplama ile kapatılarak, 3B katı model ürün formuna getirildi (Şekil 6.90).



Şekil 6.90. Auto Surfacing sonrası model ürün katı yüzey kaplanmış formu

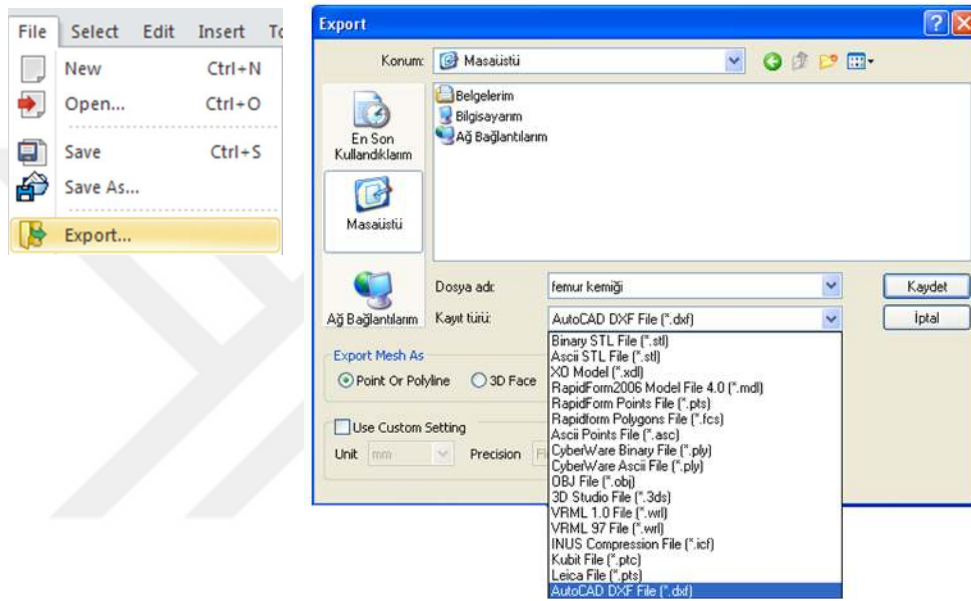
Model yüzeyi katı olduğu için katı model komutları aktif oldu (Şekil 6.91).



Şekil 6.91. Model yüzeyinin katı yüzey (surface) olduğunda aktif katı model komutları

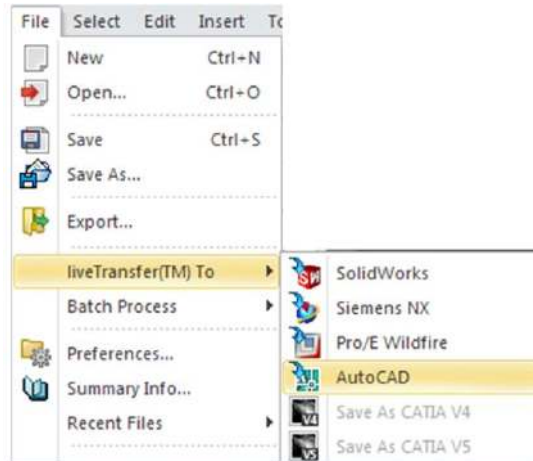
Yüzey surface ile kaplandıktan sonra katı formda olup, artık istenilen 3B modelleme programları kullanılarak katı model formunda modelleme, tasarımlar yapılabilir duruma gelmektedir. 3B modelleme programların bu dosyayı açıp çalıştırabilmesi için kullanılacak program formatına göre kayıt yapılması gerekir.

File-Export sekmesi ile istenilen program formatında kayıt yapılır. 3B CAD formatında kayıt yapmak için AutoCAD DXF File (*.dxf) seçildi (Şekil 6.92).



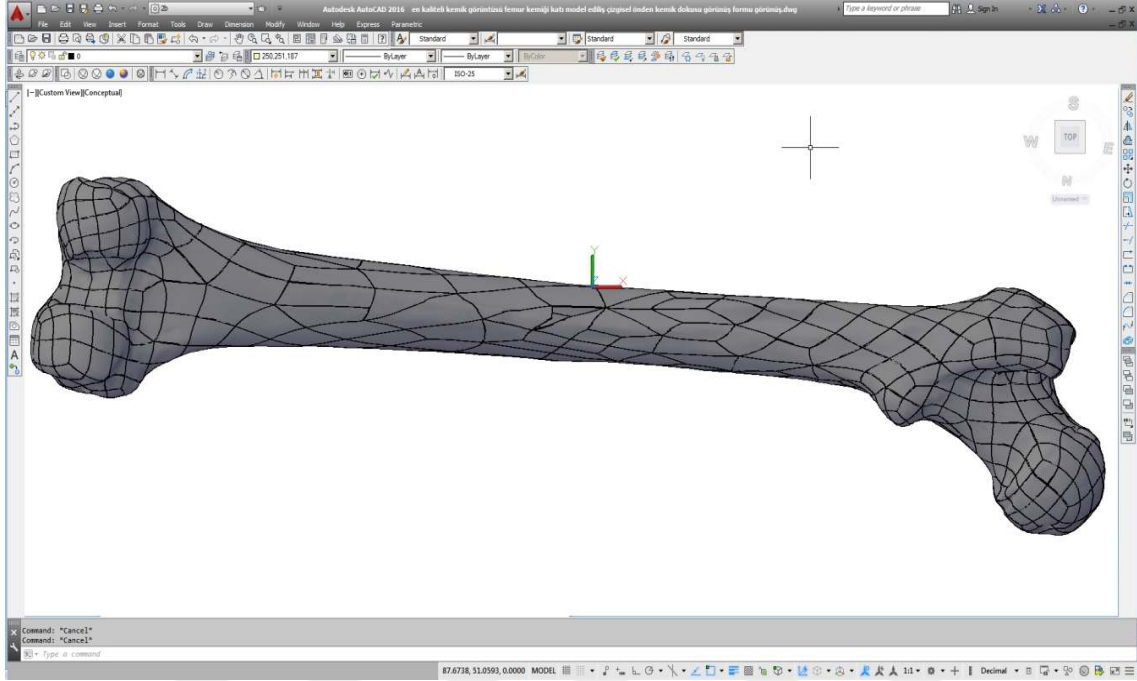
Şekil 6.92. File-Export ile dosyayı farklı program formatında kayıt yapma

Bilgisayarda ilgili program mevcut ise File-liveTransfer(TM) To seçilerek, ilgili program açılarak, dosya içeriği programın formatında görünür olmaktadır (Şekil 6.93).

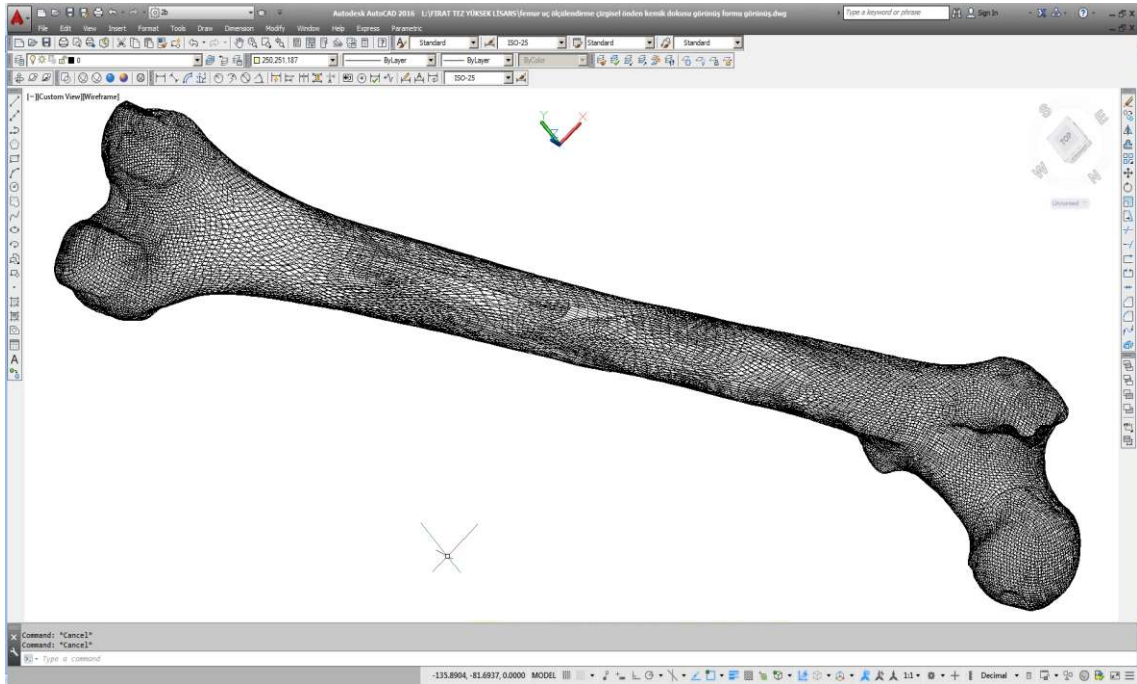


Şekil 6.93. File-liveTransfer(TM) To ile dosyayı farklı program formatında kayıt yapma

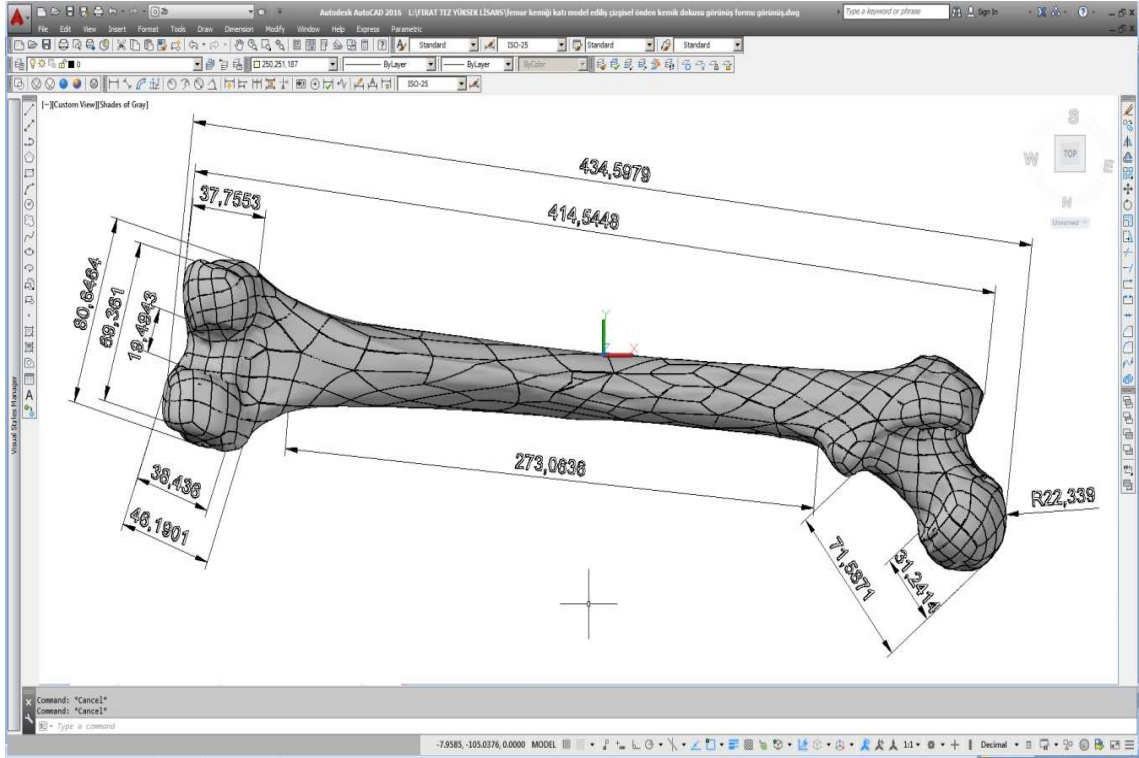
3B CAD formatında kayıt yaptıktan sonra dosyayı AUTOCAD programında açarak 3B formatta model ürünü farklı açılardan görüp, artık model ürün üzerinde ölçülendirmeler, modellemeler ve tasarımlar yapılmaktadır (Şekil 6.94 - Şekil 6.103).



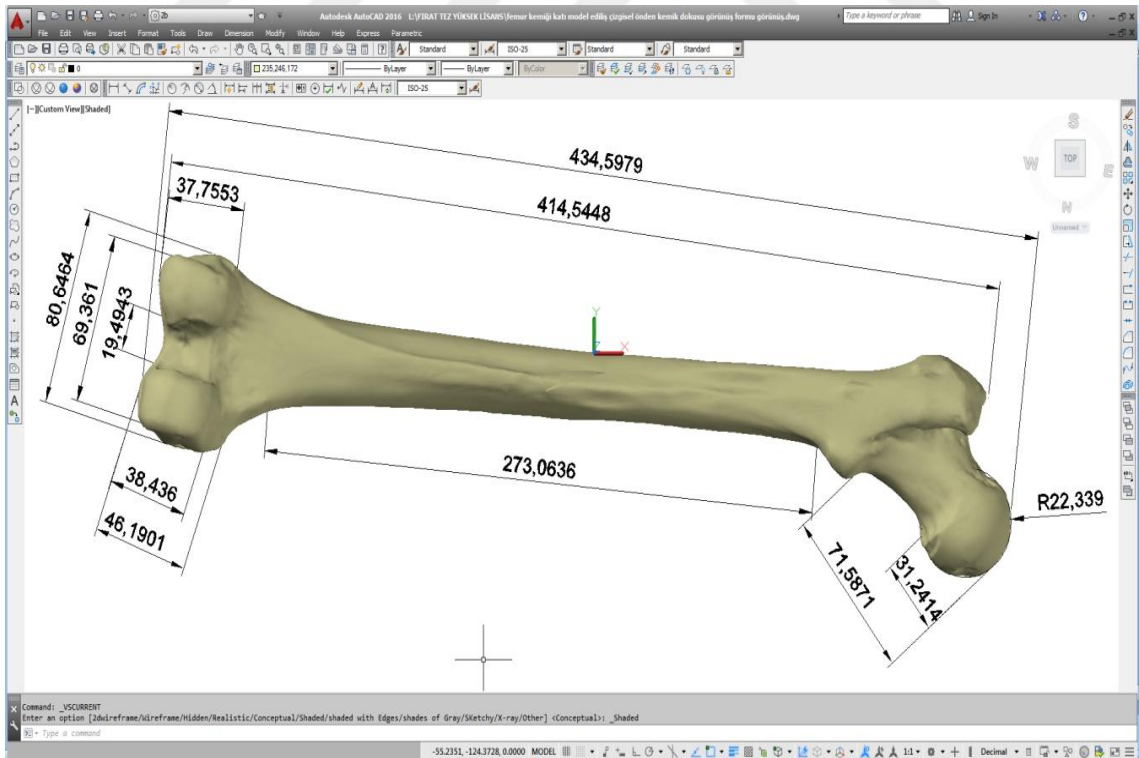
Şekil 6.94. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 1



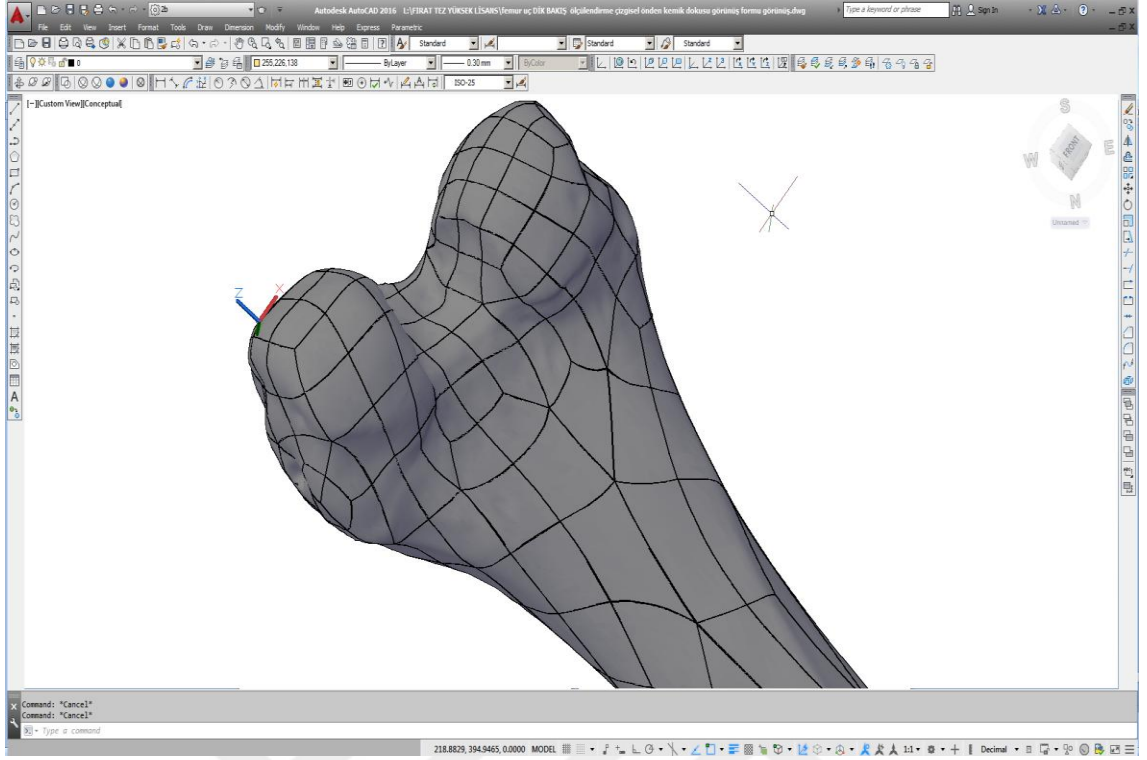
Şekil 6.95. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 2



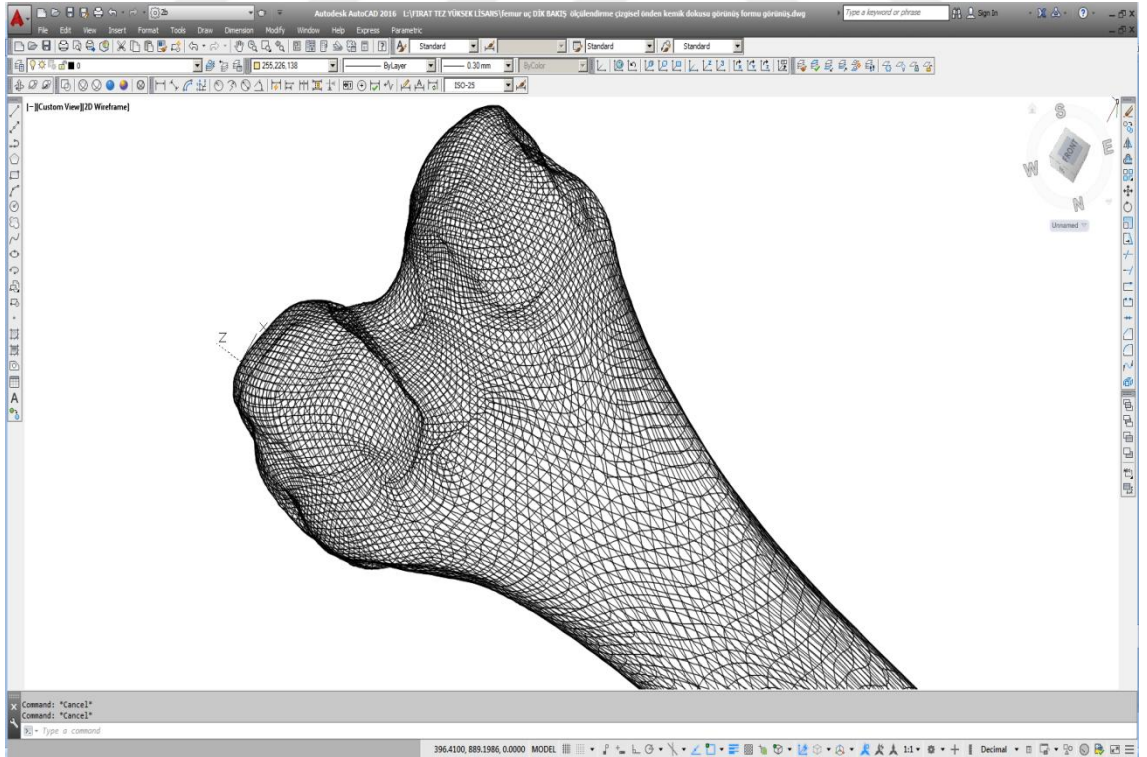
Şekil 6.96. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 3



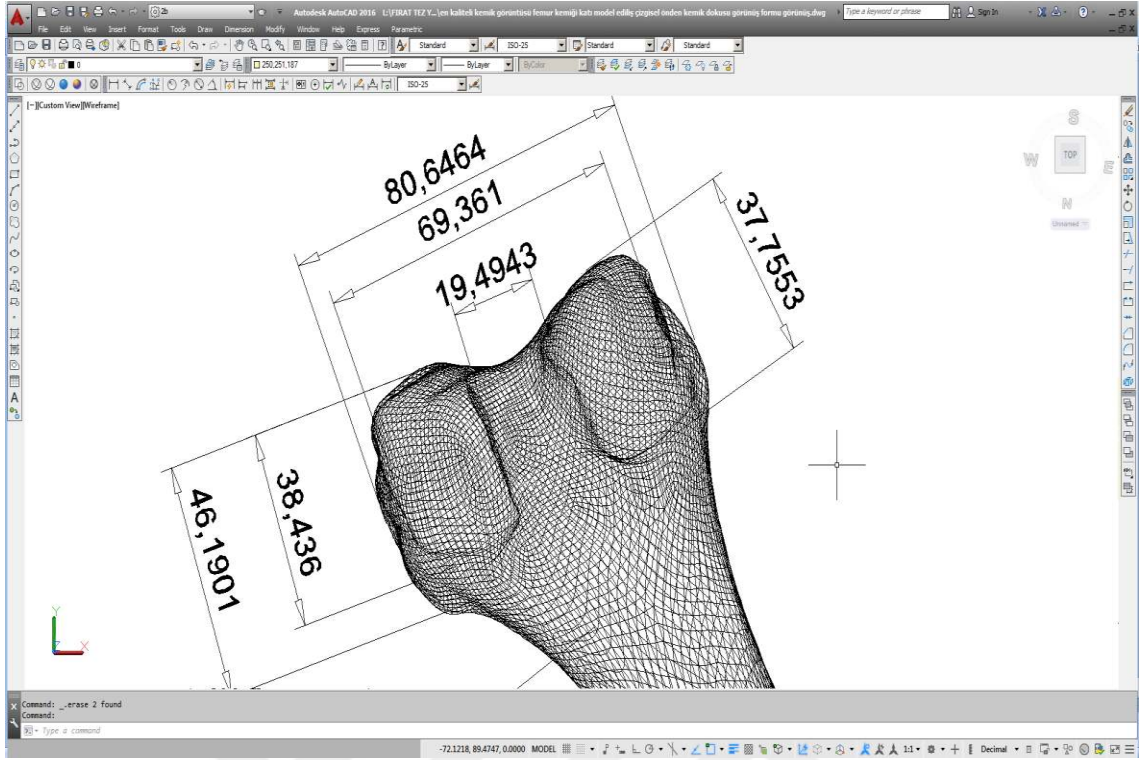
Şekil 6.97. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 4



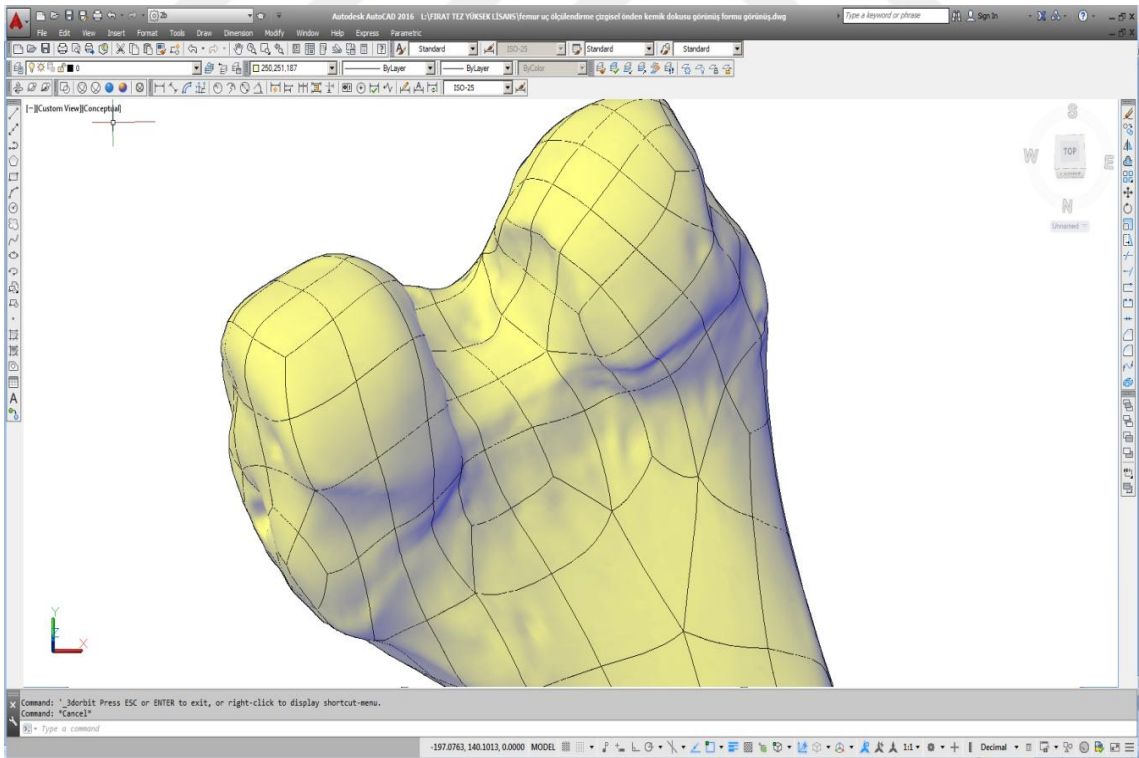
Şekil 6.98. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 5



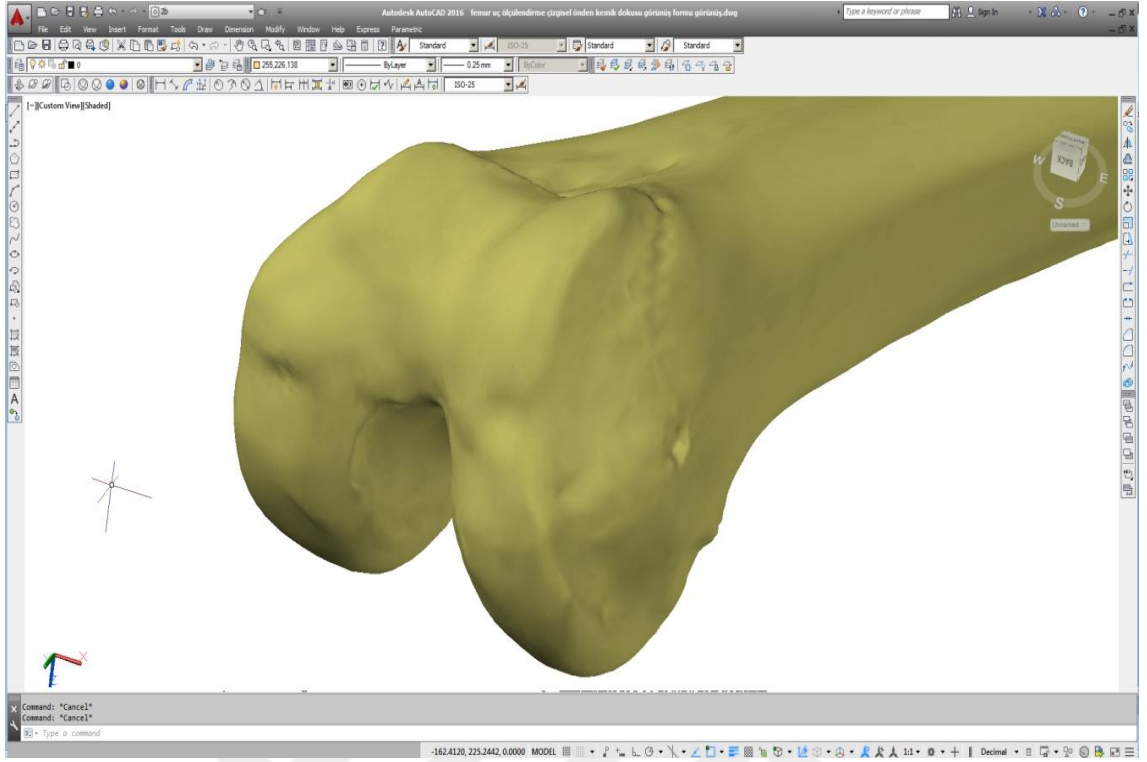
Şekil 6.99. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 6



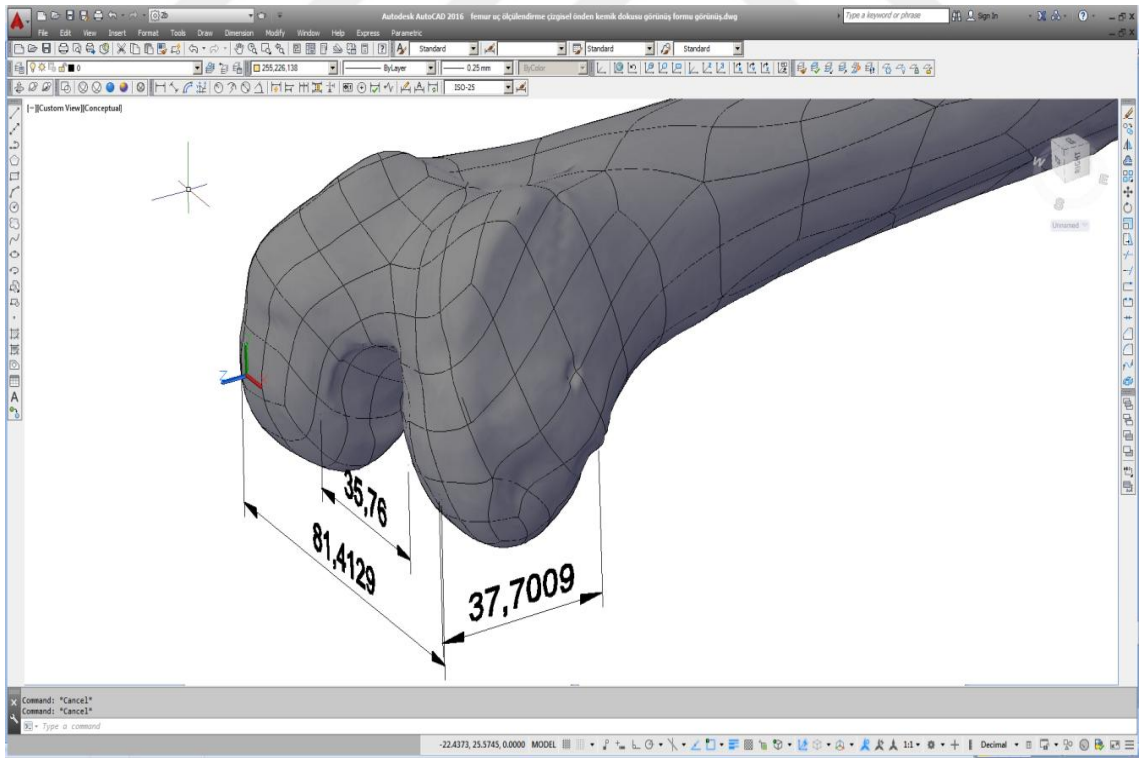
Şekil 6.100. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 7



Şekil 6.101. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 8



Şekil 6.102. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 9



Şekil 6.103. AutoCAD programında 3B CAD model görüntüsü 10

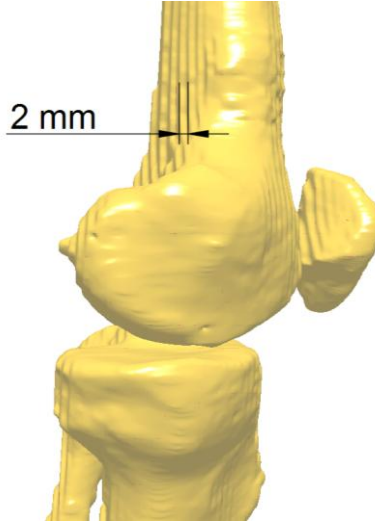
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Deneyssel çalışma l'de cerrahi müdahale ile diz protezi takılacak olan, uyluk (femur) ve kaval (tibia) kemiklerine ait Bilgisayarlı Tomografisi (CT) çekilen bir hastanın, Medikal Görüntü Formatı DICOM görüntüsü 3D-DOCTOR Demo Versiyon programından faydalanılarak STL formatında 3B model formuna getirildi.

3B model formuna getirmekteki amaç cerrahi müdahalede takılacak olan diz protezinin, doğru açılarla kemik üzerine konumlanmasını sağlamak için kişiye özel kemik keski kılavuz ve plakaları tasarlanıp, üretilerek cerrahi müdahalede kullanılabilir duruma geldi.

Z Slice Thickness (tomografi görüntü çekimi katman aralığı) 2 mm olan tomografi görüntüsü kullanıldı. Bu nedenle ilk etapta kemik dokusunun 3B modeli 2 mm aralıklarla keskin kenarlı katmanlardan oluşan bir kemik dokusu elde edildi (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Tomografi görüntü çekimi katman aralığı 2mm olan kemik dokusu görüntüsü

Keskin kenarlı katmanlardan oluşan kemik dokusu görünümü Tools-Smooth özelliği kullanılarak, keskinlikleri yuvarlatılarak azaltılmış bir kemik doku görünüm formuna getirildi.

Kemik kesi kılavuz ve plakalarının tasarlanmasında keskin kenarlı katmanlardan oluşan bir dokunun olması sorun teşkil etmemekle birlikte normalde kemik dokusu pürüzlü bir yapıda iken, pürüzsüz bir dokudaymış gibi 3B model görüntü oluştu (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Pürüzsüz bir kemik dokusu görüntüsü

3B model nokta bulutu kemik dokusu formu STL formatında kayıt yapılmıştır. Artık diz protezinin doğru açılarla kemik kesileri yapılarak takılabilmesi için 3B kemik dokusu formundaki veriden ilgili CAD programlarında kemik kesi kılavuz ve plakaları tasarlanıp üretilerek cerrahi müdahalede kullanılabilir duruma geldi.

Deneyisel çalışma 2'de tersine mühendis uygulamasında, prototip uyluk (femur) kemiğinin 1. aşamada temassız veri toplama yöntemlerinden optik tarama sistemi ile OPTOCAT programından faydalanılarak 3B nokta bulutu yüzey formatına, 2. aşamada RapidForm XOR programı kullanılarak 3B CAD model formatına getirildi.

Model ürün prototip uyluk (femur) kemiğinin 3B CAD model formatına getirilmesiyle AUTOCAD programından açılıp ölçülendirme ve tasarım yapılabilir duruma geldi.

Sonuç olarak geometrik özelliklerinden dolayı tasarım ve üretim için teknik resim çizimi imkansız olarak görülen model ürün uyluk (femur) kemiği tersine mühendislik yöntemiyle çok kolay bir şekilde teknik resminin elde edilmesiyle, model ürün uyluk (femur) kemiğinin tasarımı ve üretimi yapılabilir duruma geldi.

7.2. Öneriler

Bilgisayarlı Tomografide katmanlar halinde çekilen dataların üst üste konmasıyla, görüntü oluşturan bir yöntem kullanılır. Sağlık merkezlerimizde çekilen Bilgisayarlı Tomografilerin katman aralıkları genellikle 2 mm ile 6 mm arasındadır. Daha hassas kemik dokusu görünümü isteniyorsa katman aralığının 0,1 mm, 0.25 mm veya 0,5 mm gibi aralıklarda olması ile hassasiyeti yüksek 3B CAD model görünümü elde edilecektir. Ancak bu aralıklarla sağlık merkezlerimizde tomografi çekilmesi durumunda, tomografi çekim sürecinin çok uzun olacağından günümüz şartlarında sağlık merkezlerinde hasta birikmelerine sebep olabileceği bilinmelidir.

Taramalarda prototip kemik parçayı koymuş olduğumuz masanın üzerine örttüğümüz masa örtüsü, tozlu olduğunda yaptığımız taramalarda masa örtüsü üzerinde olan tozu tarama datası olarak algıladığından dolayı yüzey eşleştirmeleri sonrasında tozdan oluşan hatalı datayı silip tozu temizleyerek yeniden tarama yapma ihtiyacı olmuştur. Bu nedenle tarama sürecimiz uzamıştır. Tozdan arındırılmış ortamda daha hassas görüntü elde edilmiştir.

Taramalarda kamera görüntüleri alınırken ortam aydınlatması yüksek olduğunda yapılan taramalarda daha az nokta bulutu verisi, ortam aydınlatması düşük olduğunda yapılan taramalarda daha çok nokta bulutu verisi elde edildiğinden ortam aydınlatması düşük olarak tarama yapmak daha iyi sonuçlar verecektir.

KAYNAKÇA

- [1] **Kibaroğlu, M.A.**, 2006. Tasarım Sürecinde Üç Boyutlu Modellemenin Rolü ve Cad/Cam Programlarının Sınıflandırılması, T.C. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü Endüstri Ürünleri Tasarımı Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [2] **Berbercuma, G.**, 2006. Üç Boyutlu Tarayıcılar İle Veri Toplanması Ve CAD Ortamına Değişik Formatlarda Aktarılması, T.C. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Tasarım Ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- [3] **Toptaş, E.**, 2006. Tersine Mühendislik, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Mekatronik Bölümü, İstanbul, pp. 1-10, Bilgi Büroşürü.
- [4] **Bozkurt, E.S.**, 2009. Tersine Mühendislik Süreci Ve Uygulamaları, TMMOB, Makina Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, Ümraniye Temsilciliği, Teknik Söyleşi 16 Kasım, Defne Mühendislik Ltd.Şti., Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt:50 Sayı:597, Sayfa:35-42.
- [5] **Doğan, S. ve Altan M.O.**, 2003. CT, MR Kesitleri Ve Dijital Görüntüler Kullanılarak Tümörlerin Belirlenmesi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, İTÜ dergisi, Ağustos 2003, Cilt:2, Sayı:4, pp. 45-55.
- [6] **Uslu, Ü.**, 2006. Tomografik Görüntü Verilerinden 3 Boyutlu CAD Modelinin Olusturulması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında Hazırlanan, İstanbul, pp. 30.
- [7] **Paulic, M., Irgolic, T., Balic, J., Cus, F., Cupar, A., Brajliah, T. and Drstvensek, I.**, 2014. Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, ScienceDirect, Procedia Engineering, Vol.69, pp. 795 – 803.
- [8] **Hofmann, J., Flisch A. and Obrist A.**, 2003. Adaptive CT scanning mesh based optimisation methods for industrial X-ray computed tomography applications, Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research, EMPA, Department of Electronics Metrology, Duebendorf, Switzerland.
- [9] **Mutlu, İ., Özkan, A. ve Kişioğlu, Y.**, 2009. Sonlu Elemanlar Tabanlı Analiz İçin Biyomekanik Model Oluşturma Teknikleri, Kocaeli Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- [10] **Verim, Ö., Taşgetiren, S. ve Öksüz, M.**, 2010. Bilgisayar Destekli Organ Mühendisliği Temel Yaklaşımları, BiyoTeknoloji Elektronik Dergisi, Kısa Makale, No: 1, Cilt: 1 pp. 27-34.

- [11] **Samtaş, G.**, 2009. Dijital Görüntülerden Üç Boyutlu Cad Modellerin Elde Edilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Eğitimi, Doktora Tezi, Ankara.
- [12] **Çelik, D.**, 2015. Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, Prototipi Ve Tersine Mühendislik Uygulamaları Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- [13] **Çetinel, M.**, 2008. Tersine Mühendislik İle Üç Boyutlu Cisimlerden Grafik Modeller İçin Veri Eldesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fbe Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [14] **Ayyıldız, M.**, 2009. Hasarlı Makine Elemanlarının Tersine Mühendislik İle Tasarım ve İmalat İçin Yenilenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, pp. 3.
- [15] **Sherry, N.A.**, 2005. Reverse Engineering of Automotive Parts Applying Laser Scanning and Structured Light Techniques, Project in Lieu of Thesis presented for the Masters of Science Degree, The University of Tennessee, Knoxville.
- [16] **Sokovic, M. and Kopac, J.**, 2006. RE (Reverse Engineering) As Necessary Phase By, Journal of Materials Processing Technology, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, pp. 398–403.
- [17] **Ayyıldız, M. ve Çiçek, A.**, 2010. Düz Dişli Tasarımında Bir Tersine Mühendislik Uygulaması, Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, Düzce, Cilt 14, Sayı 1.
- [18] **Sokovic, M. and Kopac, J.**, 2003. RE (Reverse Engineering) As Necessary Phase By Rapid Product Development, 12th International Scientific Conference, Achievements In Mechanical Materials Engineering Conference Proceedings, Faculty of Mechanical Engineering University of Ljubljana Slovenia.
- [19] **Sokovic, M., Cedilnik, M. and Kopac, J.**, May 2005. Use Of 3D-Scanning And Reverse Engineering By Manufacturing Of Complex Shapes, 13 Th International Scientific Conference On Achievements In Mechanical And Materials Engineering, Gliwice-Wista, Poland.
- [20] **Tadi, Suresh Babu and Palankannayil, George Siji**, 2011. Rapid Mould Manufacturing For Sculptured Shaped Part, Eng, Instructor/Trainer, Department of Mechanical Engineering Technology Proceedings in Manufacturing Systems, Yanbu, Saudi Arabia, Vol. 6, Iss. 3 pp. 181-185.
- [21] <http://www.bwctechnologies.com/Turbine-Services/Reverse-Engineering> Reverse Engineering. 10 Temmuz 2018.
- [22] **HELMEL**, 2011. Engineering Products, Inc. Builders of Coordinate Measuring Machines, Helmel Engineering Products, Inc. 1973 Microstar 1m Series Katalog, Niagara, USA.

- [23] <http://www.nestechglobal.com/laser-re.html#> 3D Laser Scanning Services. 8 Temmuz 2018.
- [24] **Sagbaşı, B. ve Durakbaşı, M.N.**, 2012. Measurement of Wear in Orthopedic Prosthesis, Acta Physica Polonica A, Proceedings of the International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science, Antalya 2011, cilt 121, no 1, pp. 6.
- [25] **Çakılcı, K., Yakut, M. ve Kandilli, İ.**, 2005. Dijital Görüntü İşleme İle Laser Tarama Tekniği Kullanarak Ürün Kalitesinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi M.Y.O. Endüstriyel Elektronik Programı, Karamürsel-Kocaeli.
- [26] **Gök, A., Göloğlu, C. ve Demirci, H.İ.**, 2014. Dışbükey Ve İçbükey Yüzeylerin Küresel Parmak Frezelenmesinde Takım Sehimine Bağlı Form Hatalarının Belirlenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 29, No 2, pp. 365-374.
- [27] <http://www.tulga.com.tr/hizmetlerimiz/tersine-muhendislik/3-boyutlu-tarama> 3Boyutlu Tarama. 12 Temmuz 2018.
- [28] <http://www.akincimakina.com.tr/lazer-tarama-ile-kalite-kontrol/faro-tarama-ornek-uygulama> Lazer Tarama Örnek Uygulama. 19 Temmuz 2018.
- [29] <http://www.akincimakina.com.tr/lazer-tarama-ile-kalite-kontrol/lazer-tarama-kalite-kontrol-rapor-otomotiv-parcasi/> Lazer Tarama ile Kalite Kontrol Rapor Örneği. 18 Temmuz 2018.
- [30] <http://www.akincimakina.com.tr/cmm-olcumu/lazer-tarama-ile-kalip-formu-kontrolu/> Lazer Tarama ile Kalıp Taraması. 18 Temmuz 2018.
- [31] **Teke, İ., Yandayan, T. ve Karadayı, R.**, 2013. Koordinat Ölçüm Metrolojisi, Üç Boyutlu Ölçüm Cihazı (Cmm) Modernizasyonu, Kalibrasyonu, Verifikasyonu, Dünyada Ve Ülkemizdeki Durum, VIII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi 26-28 Eylül, Gebze-Kocaeli, pp.1-11.
- [32] **Ören, S., Yasa, E., Uğur, E., Poyraz, Ö., Akbulut, G. ve Pilatin, S.**, 2014. Havacılık Sektöründe Optik Ölçüm Yöntemlerinin Yeri Ve Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma, Mühendis ve Makine Dergisi-35, 23 Haziran, Makale, cilt 55, sayı 654, pp. 38.
- [33] AICON 3D Systems GmbH Measurethe Advantage, Subject To Change Without Notice, www.aicon3d.com, Haziran 2015, Büroşür.
- [34] **Abdel, M. and Ebrahim, B.**, October 2015. 3D Laser Scanners Techniques Overview, Techniques Overview, International Journal of Science and Research (IJSR) 2013, Volume 4, Issue 10, pp. 327.
- [35] **Üçgül, İ., Yıldız, Ö., Kara, N. ve Öznlbant, Z.**, 06 Mayıs 2017. Havacılık Alanında Ulusal Teknoloji Uygulamaları, IX. Ulusal Uçak, Havacılık Ve Uzay Mühendisliği Kurultayı Bildiriler Kitabı, pp. 141.

- [36] EinScan-SE, EinScan-SP, Scanning Technology, the New Generation Desktop 3D Scanner, www.einscan.pro, www.3dcadcam.com.tr, 3D CAD/CAM Technology Shining 30, Büroşür, İstanbul, TURKEY.
- [37] <https://www.novacam.com/products/tube-inspect-for-tube-id-and-od> TubeInspect For High-Precision Tube ID and OD Metrology. 20 Temmuz 2018.
- [38] **Guido, G.**, 2012. Structured Lighting, <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15385-s06/lectures/ppts/lec-17.ppt>, 3D Computer Vision Sunu.
- [39] **Reinhard, K.**, 2014. Concise Computer Vision An Introduction into Theory and Algorithms, www.springer.com/series/7592, Undergraduate Topics in Computer Science, University of Auckland Auckland, New Zealand, pp. 256.
- [40] **Gelautz, M. and Bleyer, M.**, 2009. Stereo Analysis and 3D Video/TV, ISPA 2009 Special Session, <http://www.isispa.org/>, Büroşür, Institute for Software Technology and Interactive Systems, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
- [41] **Yastıklı, N. Erişir Z., Altıntaş, P. ve Çak, T.**, 2014. Yersel Fotogrametrinin Tersine Mühendislik Uygulamalarında Kullanımı, Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa, İstanbul, V. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2014) 14-17 Ekim, İstanbul.
- [42] **Abdikan, S. ve Marangoz, M.A.**, 2015-2016. A.M. Fotogrametri II Ders Notları, Bülent Ecevit Üniversitesi, Türkiye.
- [43] ProJet® CJP 660Pro ile Üretilmiş Ürünlere Ait Resimler, www.dutap.duzce.edu.tr/Dokumanlar/katalog_sonhali.pdf, 19 Ocak 2017, Tasarım-Prototipleme ve Test Merkezi Cihazlar Kataloğu.
- [44] **Hansen, R.K. and Andersen, P.A.**, 1993. 3D Acoustic Camera For Underwater Imaging, Acoustical Imaging, Volume 20, Edited by Y. Wei and B. Gu, New York, Bergen, Norway, pp. 724.
- [45] <http://www.infotron.com.tr/index.php/3d-tarama-kalite-kontrol-tersine-muhendislik-sektorler> Uygulamalar, Otomotiv, Havacılık ve Uzay Denizcilik, Savunma Sanayi, Mimari ve İnşaat, Medikal, InfoTRON İstanbul. 05 Temmuz 2018.
- [46] **Subburaj, K., Nair, C., Rajesh, S. and Meshram, M.S.**, 2007. Rapid Development Of Auricular Prosthesis Using CAD And Rapid Prototyping Technologies, Technical Note Facial Rehabilitation Int. J. of Oral Maxillofacial Surgery, Volume 36, pp.938–943.
- [47] **Özkan, A. ve Atmaca, H.**, 2013. Femur Boyun Geometrisinin Femur ve Pelvis Üzerindeki Gerilme Dağılımına Etkisi, Düzce Üniversitesi Mühendislik, Fakültesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Düzce, Düzce Tıp Dergisi, Cilt: 15(2), pp.1-6.

- [48] <http://www.3d-doctor.com/download.html> Download 3D-DOCTOR Trial Version, 3D-DOCTOR Demo Version, 20 Temmuz 2018.
- [49] <http://www.3d-doctor.com/mvwizard.html> Click Here To Watch a 3D-DOCTOR Demo Video, 3D-DOCTOR, 20 Temmuz 2018.
- [50] 3D Imaging, Modeling and Measurement Software, Quick Start Guide, Tutorials, View Controls, Editing Tools 3D Model and Volume Rendering, 3D-DOCTOR User's Manual, 2012, <http://www.ablesw.com>, Able Software Corp.
- [51] **Bilgisayar Destekli Makine Ressamlığı Bölümü Öğretmenleri Eren Nuray, Ezer Sinan, Özay Gürbüz**, 2011. Kişiyi Özel Protez Projesi, Tophane Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde, Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansının (BEBKA) desteğiyle, Proje Referans No: TR41-11-AY-046.
- [52] <https://www.haberler.com/kanser-hastasına-lise-ogretmenlerinden-yeni-yuz-7152976-haberi/?oku=1> Kanser Hastasına Lise Öğretmenlerinden "Yeni Yüz". 03 Nisan 2015.
- [53] <http://www.radikal.com.tr/bursa-haber/kanser-hastasına-lise-ogretmenlerinden-yeni-yuz-1327520/> Kanser Hastasına Lise Öğretmenlerinden "Yeni Yüz". 03 Nisan 2015.
- [54] <https://www.aa.com.tr/tr/vg/video-galeri/kanser-hastasına-lise-ogretmenlerinden-yeni-yuz/0> Kanser Hastasına Lise Öğretmenlerinden Yeni Yüz. 03 Temmuz 2015.
- [55] <https://www.diyadinnet.com/haberi-136121-bursa-kanser-hastasına-lise-ogretmenlerinden-yeni-yuz> Bursa Kanser Hastasına Lise Öğretmenlerinden Yeni Yüz. 10 Nisan 2018.
- [56] <http://genufix.com/knee-injuries/knee-arthritis/total-knee-replacement/> Total Knee Replacement. 26 Temmuz 2018.
- [57] http://www.omnils.com/patients/about_OMNIBotics.cfm OMNIBotics Total Knee Replacement: A Patient Education Video, OMNI, OMNIBotics, 26 Temmuz 2018.
- [58] <https://www.materialise.com/en/medical/patient-specific-guides/patient-specific-knee-guides> Patient-Specific Knee Guides, Materialise. 20 Temmuz 2018.
- [59] <https://www.materialise.com/en/blog/total-knee-replacement-guides> Increased Efficiency and Less Invasive Surgery with Patient-Specific Knee Guides. 20 Temmuz 2018.
- [60] http://www.omnils.com/patients/about_OMNIBotics.cfm OMNIBotic Total Knee Replacement A Patient Education Video, OMNI, OMNIBotics. 20 Temmuz 2018.
- [61] <https://patients.stryker.com/knee-replacement/procedures/mako-robotic-arm-assisted-total-knee> Mako Total Knee Replacement, Stryker. 20 Temmuz 2018.

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı DEMİR	
KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES :	<i>Fırat Üniversitesi, 23119 – Elazığ</i>
TELEFON :	<i>+90 (555 290 45 71)</i>
EPOSTA :	<i>demhakkı@hotmail.com</i>
DOĞUM YERİ/TARİHİ:	<i>MALATYA / 1977</i>
MEDENİ HALİ:	<i>Evli</i>
EĞİTİM BİLGİLERİ	
LİSANSÜSTÜ:	
LİSANS :	<i>2000, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Talaşlı Üretim Öğrt., Ankara</i>
LİSE :	<i>2016, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Malatya</i>
LİSE :	<i>1995, Ş.K.Ö. Makine Teknik Lise, Malatya</i>
İŞ DENEYİMİ	
2010 – 20...	<i>Milli Eğitim /Ş.K.Ö.Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Malatya</i>
2003 – 20...	<i>Makine Teknoloji Öğretmeni</i>
2003 – 2010	<i>Milli Eğitim /Bilçay Bilgisayar Kursu, Malatya</i>
2001 – 2002	<i>İşletmenlik ve Autocad Ders Öğretmenliği</i>
2003 – 2010	<i>Malatya İplik Tekstil Fabrikası, Malatya</i>
2001 – 2002	<i>Makine Bakım Mühendisi-Şefi</i>
2001 – 2002	<i>Mode-Al Alüminyum, Ankara</i>
2001 – 2002	<i>Tasarım Sorumlusu</i>
2001 – 2002	<i>Milli Eğitim /Başak Bilgisayar Kursu, Ankara</i>
2001 – 2002	<i>Autocad Ders Öğretmenliği</i>
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
	<i>İngilizce (B1)</i>
ARAŞTIRMA DENEYİMİ	
✓	<i>CAD, CAM, CNC</i>
✓	<i>OPTOCAT, RapidForm XOR, 3D-DOCTOR,</i>
✓	<i>Autocad, Solidworks, Visual Basic, Microsoft Office</i>
İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER	
✓	<i>Futbol, Santraç, Masa Tenisi</i>