

3D CAD YAZILIMLARI KULLANARAK ÜÇ BOYUTLU TARAMA VERİSİ İLE TERSİNE
MÜHENDİSLİK UYGULAMASI

Ebru IŞIK

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Ağustos - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ebru IŞIK tarafından hazırlanan “3D CAD Yazılımları Kullanarak Üç Boyutlu Tarama Verisi ile Tersine Mühendislik Uygulaması” adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

12/08/2020

Prof. Dr. Şahmurat ARIK

Enstitü Müdürü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Anabilim Dalı Başkanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Danışman, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet CAN

Endüstriyel Tasarım Bölümü, Necmettin Erbakan Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ Makine Mühendisliği Bölümü,

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %10 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Ebru IŞIK

3D CAD YAZILIMLARI KULLANARAK ÜÇ BOYUTLU TARAMA VERİSİ İLE TERSİNE MÜHENDİSLİK UYGULAMASI

Ebru IŞIK

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2020

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmet ÇELİK

ÖZET

Tersine mühendislik, bir sistemin ya da objenin; tasarımının ve çalışma mekanizmasının, analiz edilmesidir. Tersine mühendislik işlemlerinde ilk olarak belirlenen nesnenin taraması optik ya da lazer tarama cihazlarıyla yapılır. Taramayla elde edilen veriler nokta bulutu ya da STL (Standard Triangle Language) formatında bilgisayar ortamına aktarılır, bu verilerden yola çıkılarak taranan nesnenin katı modeli oluşturulur. Programda oluşturulan katı modelden prototip veya nihai ürün üretilir. Klasik imalat yöntemlerinde, modelin üç boyutlu tasarımı bilgisayar destekli tasarım programlarında yapılır ardından bilgisayar destekli üretim metotlarından uygun olan seçilerek üretilir. Tersine mühendislikte ise üretimi yapılmış modelden başlanarak klasik imalatın tersi yönünde işlemler ilerletilir.

Tersine mühendislik işlemleri genellikle tersine mühendislik için özel hazırlanan programlar ile yapılmaktadır. Günümüzde endüstride tasarım için yaygın kullanılan CAD programları ile de tersine mühendislik işlemleri yapılabilir hale gelmiştir. Ancak endüstride bu CAD programlarının tersine mühendislik için de kullanılabildiği pek fazla bilinmemektedir.

Bu çalışmada amaç, endüstride tasarım için yaygın kullanılan CAD programlarının tersine mühendislik işlemleri için de kullanılabileceğini göstermektir. Tek programla hem tasarım hem de tersine mühendislik işlemlerini yapmak tasarımcıya, aynı ara yüzü kullandığından, hız kazandırır ve firmalar tarafından tersine mühendislik işlemleri için özel olarak satın alınan ikinci programın maliyeti ortadan kalkar. Bu çalışmada tersine mühendislik işlemleri, endüstride tasarım için yaygın kullanılan CAD programlarından SOLIDWORKS programında yapılmıştır. Çalışma kapsamında, ilk olarak çeşitli firmalardan alınan örnek parçalar taranmıştır. Daha sonra taranan parçalar nokta bulutu ya da STL formatında CAD programına aktarılıp programın tersine mühendislikle ilgili modüllerinde düzenlenerek ilgili parçaların CAD dataları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD), 3 boyutlu optik tarama, STL (Standard Triangle Language), Tersine Mühendislik

REVERSE ENGINEERING APPLICATION WITH THREE-DIMENSIONAL SCANNING DATA BY USING 3D CAD SOFTWARE

Ebru IŞIK

Mechanical Engineering, Master's Thesis, 2020

Thesis Instructor: Prof. Dr. İsmet ÇELİK

SUMMARY

Reverse engineering is the analysis of the design and working mechanism of a system or object. In reverse engineering, the firstly specified object is scanned with optical or laser scanning devices.. The data obtained by scanning are transferred to the computer environment in point cloud or STL (Standard Triangle Language) format, based on this data, the solid model of the scanned object is created.. A prototype or final product is produced from the solid model created in the program. In classical manufacturing methods, the three-dimensional design of the model is made in computer-aided design programs, then it is produced by selecting the appropriate one from the computer-aided production methods. In reverse engineering, starting from the model produced, processes are carried out in the opposite direction of classical manufacturing.

Reverse engineering processes are generally carried out with specially prepared programs for reverse engineering. Nowadays, reverse engineering processes can be made with CAD programs widely used in the industry for design. However, it is not known in the industry that these CAD programs can also be used for reverse engineering.

The aim of this study is to show that CAD programs which commonly used in industry for design can be used in reverse engineering processes. Performing both design and reverse engineering operations with a single program gives the designer speed as it uses the same interface, and the cost of the second program specially purchased by companies for reverse engineering operations is eliminated. In this study, reverse engineering processes were performed in SOLIDWORKS, one of the CAD programs widely used for design in the industry. In the scope of the study, firstly sample parts taken from various companies were scanned. Then, the scanned parts were transferred to the CAD program in point cloud or STL format, and the CAD data of the relevant parts were obtained by arranging them in the reverse engineering modules of the program.

Keywords: Computer Aided Design (CAD), 3D optical scanning, Reverse Engineering, STL (Standard Triangle Language)

TEŞEKKÜR

Tezimle ilgili çalışmaların her aşamasında görüşleriyle yön veren, bilgilerini, tecrübelerini ve değerli katkılarını benden hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. İsmet ÇELİK'e, çalışmanın uygulama kısmında yazılım ve tarama sistemlerinden yararlandığım KDPÜ İLTEM'e, hayatım boyunca bütün çalışmalarımnda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta annem ve babam Hatice ve Kadir BAŞARAN olmak üzere tüm aileme, çalışma dönemim boyunca beni hiç yalnız bırakmayan sevgili eşim Fatih Mehmet IŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. TERSİNE MÜHENDİSLİK	8
2.1. Ölçme	11
2.2. Veri Toplama Teknikleri	12
2.2.1. Temassız veri toplama yöntemleri	13
2.2.2. Temassız veri toplama yöntemleri	15
3. MATERYAL VE METOD	32
3.1. Tersine Mühendislik İşlem Basamakları	34
3.1.1. Tarama veya dijitalleşme	34
3.1.2. Tarama Verisinin İşlenmesi	35
3.1.3. İşlenen Veriden Yüzey Oluşturulması	36
3.1.4. Hızlı prototipleme ile imalat	44
3.2. Örnek Çalışma 1	45
3.3. Örnek Çalışma 2	51
3.4. Örnek Çalışma 3	56
4. SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR DİZİNİ	62
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Tarihi Yarımada'daki sarnıçlı nokta bulutu verisi	8
2.2. Parmak izine ait tarama verisi han	9
2.3. Tersine mühendislik işlemlerinin genel akış şeması	10
2.4. Bilgisayar destekli tersine mühendislik süreci	10
2.5. Ölçüm aleti ve cihazı.	11
2.6. CMM ve mekanik kollu sistem.	12
2.7. Tersine mühendislik uygulamalarında veri toplama.	13
2.8. Veri toplamada kullanılan robotik kol	14
2.9. Veri toplamada kullanılan CMM makinesi.....	15
2.10. Tarama parçası ve tarama işlemi	16
2.11. Tarama ile elde edilen nokta bulutu, STL yapı ve sonuç olarak ulaşılan CAD yapı	16
2.12. Tesis yönetimi için lazer tarama.	18
2.13. Olay yeri inceleme için lazer tarama	18
2.14. Kaza yeniden kurgulama için lazer tarama.	19
2.15. İnşaat sektörü için lazerli tarama.....	19
2.16. Bursa Ulu Cami için yapılmış lazerli tarama.	20
2.17. Farklı renklerde yapılan tarama.	21
2.18. Tek, çift ve asimetric kameralı optik tarama cihazları.	21
2.19. Tek kameralı optik cihaz sistemi	22
2.20. Çift kameralı optik cihazların sistemi	22
2.21. Lazer üçgenleme metodu	23
2.22. Uçuş süresi metodu kullanan cihazlar.....	24
2.23. Lazer interferometre ile takım tezgâhları doğrusal hataların ölçümü	25
2.24. Yapısal ışıklandırma sistemi	26
2.25. Yapısal ışıklandırma metoduyla tarama.	26
2.26. Yersel fotogrametri ile elde edilen fotoğraflar	27
2.27. Yersel fotogrametri ile oluşturulan 3B model	28
2.28. Konilerin kesiştirilmesi yöntemi.	28
2.29. Akustik yöntem ile veri elde edilmesi	29
3.1. HDI ADVANCE optik tarama cihazı.	32
3.2. ROMER ABSOLUTE ARM 7252SI lazer tarama cihazı.	33
3.3. SCAN IN A BOX FX optik tarama cihazı.	33

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.4. Tersine mühendislik işlemi şeması	34
3.5. Tarama işlemi.	35
3.6. Scan to 3D modülleri.	36
3.7. Mesh oryantasyonu.	37
3.8. Dışarıdan veri çıkarma.	37
3.9. Basitleştirme işlemi.	38
3.10. Düzleştirme işlemi.	38
3.11. Boşluk doldurma işlemi.	39
3.12. Mesh düzenleme modülü.	39
3.13. Yüzey sihirbazı modülü.	40
3.14. Otomatik yüzey oluşturma.	40
3.15. Yönlendirilmiş yüzey oluşturma.	41
3.16. Mesh ayırma işlemi.	41
3.17. Yüz tanıma işlemi.	42
3.18. Yüzey çıkarma işlemi.	42
3.19. Eğri sihirbazı modülü.	43
3.20. Sapma analizi modülü.	43
3.21. Modelin optik tarama cihazıyla taranması.	46
3.22. 3 Boyutlu tarama ile elde edilen '.stl' veri.	46
3.23. 3 Boyutlu tarama ile elde edilen mesh yapısı.	47
3.24. Modelin mesh boyutunun azaltılması.	47
3.25. Model etrafında ya da üzerinde istenmeyen verilerin silinmesi.	48
3.26. Model yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi.	48
3.27. Model üzerindeki boşlukların doldurulması.	48
3.28. Modeli alt bölümlere ayırma.	49
3.29. Meshi uygun geometrik şekillerle kaplayarak yüzey oluşturma.	49
3.30. Çalışma sonucunda oluşturulan katı modele.	50
3.31. Meshin sınır geometrisinin belirlenmesi.	50
3.32. Modelden elde edilen kesitler.	51
3.33. Çalışma sonucunda oluşturulan katı model.	51
3.34. Modelin lazer tarama cihazı ile taranması.	52
3.35. Mesh yapının '.stl' formatında programa aktarılması.	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.36. Model çevresinde oluşan gereksiz verilerin temizlenmesi.	53
3.37. Modelin mesh boyutunun azaltılması.	53
3.38. Model formunun pürüzsüzleştirilmesi.	54
3.39. Modelde gerekli görülen boşlukların doldurulması.	54
3.40. Modelin sınırının çıkartılması.	55
3.41. Modelden elde edilen kesitler.	55
3.42. Çalışma sonucunda oluşturulan katı model.	56
3.43. Modelin optik taramayla taranması.	56
3.44. Optik tarama ile elde edilen Mesh'li yapının programa aktarılması.	57
3.45. Model çevresinde ya da üzerinde istenmeyen verilerin temizlenmesi.	57
3.46. Mesh boyutu azaltıldığında modelde oluşan şekil bozukluğu.	57
3.47. Model sınırlarının pürüzsüzleştirilmesi.	58
3.48. Model üzerinde gerekli olan boşlukların doldurulması.	58
3.49. Modelin sınırlarını çıkarma.	59
3.50. Modelden elde edilen kesitler.	59
3.51. Çalışma sonucunda oluşturulan yüzey.	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Temaslı tarama yönteminin avantajları ve dezavantajları.	30
2.2. Temassız tarama yönteminin avantajları ve dezavantajları	31



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Kısaltma</u>
2B	2 Boyutlu
3B	3 Boyutlu
3D	Three Dimensional (3 Boyutlu)
BDİ	Bilgisayar Destekli İmalat
BDM	Bilgisayar Destekli Mühendislik
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli İmalat)
CDD	Dijital Fotoğraf Kamera
CMM	Koordinat Ölçüm Makineleri
IGES	International Graphics Exchange Standart (Uluslararası Grafik Dönüştürme Standartı)
STL	Standard Triangle Language (Standart Üçgen Dili)
TM	Tersine Mühendislik

1. GİRİŞ

Bir ürünün standart üretim aşamaları, ürünün bilgisayar ortamında katı modelinin oluşturulmasıyla başlayıp bilgisayar destekli makinelerde üretilmesiyle tamamlanır. Tersine mühendislikte üretim aşamaları ise mevcut ürünün optik ya da lazer tarama cihazlarıyla taranarak bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlar ürünün bilgisayar ortamında katı modelinin oluşturulmasıyla devam eder ve hızlı prototipleme ya da klasik yöntemlerle üretilmesiyle de tamamlanır. Tersine mühendislik birçok amaçla kullanılır. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

- CAD datası mevcut olmayan ya da CAD datasına ulaşılamayan parçalar tekrar üretilmek istendiğinde parçaların yeniden tasarımını yapmak uzun zaman alacağından tersine mühendislik ile mevcut parçanın CAD dataları hızlı bir şekilde oluşturulabilir.
- Dijital arşivlemede kullanılır. Tarihi eserler 3 boyutlu tarama cihazlarıyla taranarak eserlerin CAD dataları elde edilir, ürün hasar gördüğünde daha önce tersine mühendislik ile elde edilen datalar yardımıyla eserlerin hasar gören parçaları aslına uygun olarak onarılabilir.
- Kırık veya deforme olmuş CAD datası olmayan ürünlerin tekrar üretiminde kullanılabilir.
- Protez ve implant imalatında kişiye özel tasarım oluşturulabilir.
- Gerçek ölçülerdeki ürünün 3 boyutlu taraması yapıp elde edilen verinin bilgisayar ortamında arşivlenmesi sağlanabilir.
- Ürünün orijinal üreticisinin bulunmaması müşterinin bu ürüne ihtiyaç duyması halinde CAD datası tersine mühendislik ile elde edilebilir.
- Rakip firmaya ait ürünlerin iyi ve kötü yönleri incelenebilir.
- İhtiyaç duyulan bir ürünün üreticisinin kalmadığı durumlarda ürünün CAD datası tersine mühendislik ile elde edilebilir.

Tersine mühendislikle ilgili geçmişte yapılan akademik araştırmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Çetinel, çalışmasında iki ya da üç boyutlu nesnelerin ölçümünü fotoğraf verileri ile yapan bir teknik olan Fotogrametri yöntemini kullanılarak tersine mühendislik çalışmaları yapmıştır. Fotogrametrik yöntemin pratikte kullanımı için gerekli yazılım kodlarını oluşturmuş ve mevcut kodları derlemiştir. Profesyonel olmayan bir fotoğraf makinesi ve Matlab yazılımı ortamında oluşturduğu kodlar ile pratik uygulamaların gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Farklı uygulamalar için adapte edilebilecek esnek ve basit algoritmalar geliştirmiştir. Tezde araştırılan

teorik konular ve uygulamaların pratikte nasıl gerçekleştirilebileceği, gerçek bir örnek ile gösterilmiştir (Çetinel, 2008).

Kaplan, çalışmasında, bakım çalışmaları yapılan bir hidroelektrik santralinde bulunan su türbini çark kanatlarının onarımında tersine mühendislik işlemlerinden faydalanmıştır. Su türbini çark kanatlarının detaylı bir tasarımı olduğuna ve tasarımı için her tasarım programının kullanılmadığına, çark kanatlarının birden fazla adımda tasarlandığına değinmiştir. Karmaşık yapıya sahip parçaların klasik ölçüm aletleriyle (kumpas, mikrometre vb.) teknik bilgilerinin çıkarılmasının olanaksız olduğunu belirtmiştir. Tersine mühendislik yönteminde ise optik tarayıcılar yardımıyla gerekli teknik veriler toplanıp tersine mühendislik programlarıyla kolayca bu veriler işlenebileceğinden Kaplan çalışmasında tersine mühendislik yöntemini seçmiştir. Tersine mühendislik yöntemi ile farklı özellikte iki çark tasarlamıştır. Su türbin çarkları için ortaya çıkardığı tersine mühendislik yöntemini, farklı hidroelektrik santrallerinin su türbini çarklarına da uygulamıştır (Kaplan, 2016).

Sarı, çalışmasında hali hazırda kullanılan statik üst ekstremite ortezlerinin (el, kol veya ön kol işlevlerinde azalma ya da işlev kaybı olduğunda kullanılan yardımcı eleman) ciltte zedelenme, kontraktürler (adalenin kısılmasından dolayı eklem anormal şekil alması), enfeksiyon vb. komplikasyonlara neden olduğuna değinmiştir. Bu komplikasyonları en aza indirmek ya da ortadan kaldırmak amacıyla hafif, görünüm olarak daha zarif, kullanıcının su ile temasını kısıtlamayan, terlemeye neden olmayan, bakteri ve mikrop oluşumunun yaşanmadığı statik üst ekstremite ortezlerinin (el, kol veya ön kol işlevlerinde azalma ya da işlev kaybı olduğunda kullanılan yardımcı eleman) tasarımı ve 3B yazıcı vasıtasıyla üretimini amaçlamıştır. Uygun pozisyonda hastaların deformiteli uzvunun 3B tarayıcı ile taraması yapılmıştır. Taramaya dayalı olarak bilgisayar yazılımı ile 3B model tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 3B model 3B yazıcı ile imal edilmiştir. Bunun sonucunda her hastaya özel hafif, zarif, su ile temas edebilen, terlemeyen, koku yapmayan, bakteri ve mikrop oluşumunun yaşanmadığı, rahat ve konforlu ortezler elde edilmiştir (Sarı, 2019).

Demir, 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 edilmesine çalışmıştır. Tasarımı ve teknik çizimi imkansız gibi görünen insana ait prototip uyluk kemiğinin 3B model görünümü ve teknik çiziminin tersine mühendislik yöntemiyle nasıl elde edilebileceği örneklerle açıklanmıştır (Demir, 2018).

Şahin, çalışmasında önceden imal edilmiş uçak şeklindeki plastik ilaç kaşığı seçmiş tersine mühendislik yöntemini kullanarak kaşığın nokta bulutu verisini elde etmiştir. Elde ettiği nokta bulutu verilerini de Catia yazılımı yardımı ile katı modele dönüştürmüştür. Sonrasında bu modele ait kalıp tasarımları ve akış analizlerini yapmıştır. İmalat esnasında karşılaşılabilecek problemlerle ilgili ise gerekli önlemleri almış böylece parçanın problemsiz üretebileceği kalıbın tasarımını gerçekleştirmiştir (Şahin, 2018).

İçke ve Tunçer, çalışmalarında tersine mühendislik ile bir mikro turbo jet motorunun CAD verilerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Gaz türbin motorunun parçalarını optik tarayıcı ile taramışlardır. Optik tarayıcı ile elde ettikleri verileri kullanarak motor parçalarının CAD verilerini oluşturmuşlardır. Her bir motor parçasının yerinde kullanıldığında nasıl davranacağını hesaplamışlardır. Tersine mühendislik ile elde ettikleri motorun değerlerini, termodinamik çevrim analizi ile kontrol etmişlerdir. Tersine mühendislik ile elde ettikleri motor değerlerinin, bu tip motorlar için kabul edilen değerler aralığında olduğunu saptamışlardır. Tersine mühendislikle motorun CAD verilerinin elde edilmesi, sıfırdan motor tasarımı yapmaya göre daha az zaman aldığından dolayı tersine mühendisliğin zaman tasarrufu sağlayacağı çıkarımında bulunmuşlardır (İçke ve Tunçer, 2016).

Babic ve arkadaşları çalışmalarında başlangıçta mekanik nesne ayrıklaştırması ile elde edilen 3D kafeslere ait otomatik ve kapsamlı bir tersine mühendislik süreci sunmuşlardır. İlk önce, bir 3D kafesten geometrik ilkelerin otomatik algılanmasında birkaç düzeltme göstermişlerdir. Sonrasında nesnenin topolojisini tanımlamak ve ilkeller arasındaki kesişmeleri hesaplamak için yeni bir biçimcilik getirmişlerdir. Çalışmalarında önerdikleri yöntemi 3D endüstriyel kafesler üzerinde doğrulamışlardır (Babic vd., 2013).

Sofu, çalışmasını hasar görmüş bir kalıp üzerinde yapmıştır. Çalışma ile kalıbın hasar görmüş bölümünün tekrar imal edilmesi amaçlanmıştır. Teknik çizimleri ve üç boyutlu verisi bulunmayan kalıbın öncelikle optik tarayıcılarla nokta bulutunu elde etmiştir. Daha sonra nokta bulutunu tersine mühendislik programına aktararak kalıbın hasar görmüş bölümünün katı modelini elde edebilmiştir. Tersine mühendislik yöntemiyle elde ettiği katı model ile kalıbın hasar gören parçasını yeniden imal etmiştir. İmal ettiği parçayı tekrar kalıba monte ederek kalıptan başarılı bir baskı almıştır. Tersine mühendislik uygulamasıyla yeni kalıp yapım maliyeti olmadan kalıbın hasar görmüş bölümünün onarılabileceği ispatlanmış ve sürdürülebilir imalata örnek bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Sofu, M. M., 2019).

Chougule ve arkadaşları çalışmalarında invazif olmayan (cerrahi işlem gerektirmeyen uygulamalar) bilgisayarlı tomografi tarama görüntülerinden serbest form yüzeyi oluşturmak için

bir algoritma ortaya çıkarmayı amaçlamışlardır. İlk olarak görüntü işleme teknikleri ve tersine mühendislik yaklaşımı kullanarak invazif olmayan bilgisayarlı tomografi tarama görüntülerinden nokta bulutu verilerini çıkarmışlardır. Daha sonra bu nokta bulutu verilerini işlemişler (gürültü azaltma, nokta bulutu veri segmentasyonu) ve CAD model elde etmişlerdir. Algoritmayı oluşturma çalışmaları kapsamında invazif olmayan bilgisayarlı tomografi taramasını DICOM 3.0 formatında tersine mühendislik programına aktarmışlardır. Sonrasında nokta bulutu verileri, tez noktaları arasına serbest biçimli NURB yüzeyinin takılması ve süpürülmüş harman tekniği ile bu eğri ağları arasına yüzeyin yerleştirilmesiyle 3D CAD modelinin oluşturulmasını sağlamışlardır. Böylece invazif olmayan bilgisayarlı tomografi tarama görüntülerinden elde edilen nokta bulutu verilerinden serbest form yüzeyi oluşturmak için kullanılacak algoritmayı ortaya çıkarmışlardır (Chougule vd., 2014).

Engel ve arkadaşları orijinal dizaynın CAD verileri olmaması durumunda analitik, sonlu elemanlar analizi, deneysel yöntemler gibi metotlar kullanarak birbiriyle entegre olmuş tersine mühendislik ve hata analizi yaklaşımıyla orijinal dizaynın CAD verilerini elde etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmaları kapsamında CAD verileri olmayan bir makine şaftının temassız lazerle tarama ve manuel ölçme ile yüzey verilerini elde etmişler tersine mühendislik yaklaşımıyla 3D CAD modelini oluşturmuşlardır. Şaftın malzemesini spektro teknolojisi kullanarak ve pürüzlülük ile sertlik değerlerini deneysel ve analitik metotlar kullanarak belirlemişler ayrıca optik muayenelere göre yüzey işleme işleminin tornalama olduğunu saptamışlardır. Şaftın kesme, bükme ve gerilim kayıplarını ortaya çıkarmak için analitik hesaplamalar ve sonlu elemanlar analizi kullanmışlardır. Şaftın güvenlik faktörünü ortaya çıkarmak için de aynı yöntemi kullanılmışlardır. Şaftı yeni bir ürün ile karşılaştırdıklarında mekanik olarak yeni şaft gibi davrandığı, fakat yüzeyinde aşınma ve çukurlaşma olduğunu görmüşlerdir. Bu nedenle, şaftı yeniden kullanmadan önce gerekli yüzey sertliğini ve pürüzlülüğünü elde etmek için işleme ve karbürleme işlemlerinin gerektiğini belirtmişlerdir. Geliştirdikleri bu entegre yaklaşımla, herhangi bir mekanik parçanın geri kazanılması ve herhangi bir takım tezgahı için de kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlardır (Engel vd., 2019).

Önçağ ve arkadaşları sanayide kullanımı fazla olan mekanik parçaların yeniden tasarım ya da onarımı için tersine mühendislik yöntemi kullanan literatür çalışmalarını incelemiş ve bir iş akışı oluşturmuşlardır. Oluşturdukları iş akışını bir turboşarj dirseği üzerinde uygulamışlardır. Turboşarj dirseğini lazer tarama cihazıyla tarayarak parçanın datalarını elde etmişlerdir. Elde ettikleri datadan yararlanarak parçanın katı modelini oluşturmuşlardır. Elde ettikleri katı modeli birebir ölçekte 3D yazıcılarda basmışlardır. Çalışmada kullanılan örnek parçayı akış şemasına

göre değerlendirmişlerdir. 3D yazıcı kullanımının tersine mühendislik uygulamalarının standart bir parçası haline gelebileceği sonucuna ulaşmışlardır (Önçağ vd., 2018).

Babic ve arkadaşları Kortikol kemiğe çimentolanmış femoral bileşenin sonlu elemanlar modelini oluşturmak için total kalça kemiğinin CAD modelini optik 3D taramaya dayalı tersine mühendislik prosedürü ile oluşturmuşlardır. Bir çatlakla zarar gören total kalça kemiğinin gevşemiş femoral bileşenin şaftının sonlu elemanlar kırılma analizini ISO 7206-4 standardında verilen yükleme ve sınır koşullarını dikkate alarak yapmışlardır. Femoral komponent şaftında, birkaç çatlak derinliğinin dikkate alındığı bir hasar çatlak modeli oluşturmuşlardır. Gerilme yoğunluğu faktörü değerlerini, dikkate alınan çatlak derinliklerinin her biri için çatlak önü boyunca düğümlerde hesaplamışlardır. Verilen yükleme koşulları için kırık başlangıcına bağlı kritik bir çatlak boyutunun tahmin edilebileceğini göstermişlerdir (Babic vd., 2019).

Günpınar, tersine mühendislik yaklaşımıyla üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması ile ilgili bazı yöntemlere odaklanmış ve bu yöntemlerin çıkarımlarını yapmıştır. Bu yöntemler nokta bulutundan oluşturulan çözüm ağ modelini küçük ağlara ayırmaktadır. Bu küçük ağlar B-spline, küre, silindir gibi daha ileri seviye yüzeyler ile ifade edilmektedir. Çalışmasında ayrıca gemi yapım endüstrisindeki tersine mühendislik uygulamalarından da bahsetmiştir. Gemilerin büyük yapılar olduklarını bu nedenle daha küçük parçalara ayrılarak üretildiklerini ve bu parçaların birleştirilerek gemi elde edildiğini belirtmiştir. Üretilen gemi parçalarının doğruluk payını artırmak ve gemi yapım zamanını kısaltmak için gemi yapımında tersine mühendislik tekniklerinin kullanımının öneminden bahsetmiştir. Günpınar, örnek gemi yapım uygulamasında; LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) gemilerinde bulunan sekizgen tankların kapalı pozisyonlama metodundan faydalanılarak üç boyutlu geometrik modellerinin oluşumunu açıklamıştır. Ayrıca Günpınar B-spline'ın serbest yüzeyli modeller, küre-silindir gibi geometrik primitif yüzeylerin mekanik modeller için kullanımının neden daha uygun olacağını örneklerle açıklamıştır. Günpınar gerçek modele en yakın modeli elde etmek için ise B-spline ve küre-silindir gibi geometrik primitif yüzeylerin beraber kullanıldığı hibrit tekniklerin oluşturulmasını vurgulamıştır (Günpınar, 2016).

Zhang ve arkadaşları NRCP' nin (Nükleer reaktör soğutucu pompası) taşlama işlemi için robot otomasyon sistemi kullanımını incelemişlerdir. Tarama, nokta bulutu işleme, taşlama, yörünge üretimi ve tersine mühendislik temelli kalite değerlendirme sistemini uygulamışlardır. NRCP'nin nokta bulutunu, el-göz kalibrasyonunun robotik tarayıcı sistemi ile elde etmişlerdir. Çalışmalarında nokta bulutu basitleştirme, gürültü giderme ve sınır çıkarma için neighborhood oktree yapısı temelli yeni bir yöntem önermişlerdir. Taşlama işlemi için önemli noktalardan

birinin nokta bulutunun uyarlanabilir üçgen ağlara dönüştürülmesi olduğunu belirtmişlerdir. Kalite değerlendirme sistemi ile nokta bulutu ve nitelikli iş parçası arasındaki sapmayı hesaplamışlardır. Sapmaya göre farklı bir yol izleyip izlemeyeceklerini değerlendirmişlerdir. Neighborhood oktree yapısı temelli (eğriler yardımıyla nokta sayısını azaltma) nokta bulutu işleme yönteminin diğer araştırmacıların algoritmalarına göre belirgin verimlilik avantajları olduğunu saptamışlardır. Taşlama hatasının 3 mm'den az olduğu, verimliliğin manuel taşlama ile karşılaştırıldığında 2,5 kat artırılabilir olduğu sonucuna varmışlardır (Zhang vd., 2019).

Bauer ve arkadaşları kırık veya yıpranmış türbin kanatlarının yedek parçalarına ihtiyaç duyulduğunda teslim sürelerinin uzun olduğu tespitini yapmışlar ve teslim süresi uzadığında önemli görevde olan bu parçaların çalıştırılmamasının zaman kaybına sebep olduğunu bunun da maliyetin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Bakım çalışmalarında ise; özellikle eski cihazlar veya diğer üreticilerden gelen cihazların teknik çizimleri ve dizaynıyla ilgili bilgilerin olmaması nedeniyle bakım çalışmalarının yapılamadığını göstermişlerdir. Türbin kanadının 3D CAD modeli daha düşük çabayla elde edinilebileceğinden tersine mühendislik yöntemini çözüm olarak sunmuşlardır. Ayrıca değişim parçalarının kısa sürede tedarik edilmesini sağladığından eklemeli imalatı kullanmışlardır. Türbin kanadının bir kopyasını farklı hızlanma voltajlarına sahip optik tarama ve bilgisayarlı tomografi taramalarıyla taramışlar, seçici lazer eritme yöntemiyle üretmişlerdir (Bauer vd., 2019).

Literatür çalışmaları incelendiğinde teknik çizimi mevcut olmayan karmaşık yapıya sahip Francis tipi su türbini çark kanatlarının tersine mühendislik yöntemi kullanılarak imalatı, klasik yöntemlerle üretilen ortezlere nazaran daha kullanışlı kişiye özel statik üst ekstremite ortezlerinin tersine mühendislik yöntemi ile tasarımı ve 3 boyutlu yazıcılarla üretimi, tersine mühendislik yöntemiyle kişiye özel diz protezi ve protezin takılmasında kullanılacak kemik kesi kılavuz parçalarının tasarımı, bir kalıbın bozuk parçasının tersine mühendislik yöntemiyle yeniden imalatı, mekanik parçaların tersine mühendisliğine yönelik iş akış şemasının oluşturulması konularında yukarıda da açıklanan çalışmalar yapılmıştır.

Bu tezde ise; tersine mühendislik için özel olarak tasarlanmış (Geomagic, Space Claim vb. gibi) programlarda yapılan tersine mühendislik uygulamalarının, sıfırdan tasarım yapmak için kullanılan 3D CAD programlarında yapılıp yapılamayacağını araştırmak amacıyla bir çalışma yapılmıştır. 3D CAD programlarında bu işlemin yapılabilirliği ispatlandığında endüstrimizin ikinci bir program için harcayacağı program maliyeti ve personelin yeni programı öğrenme maliyetinin önüne geçilmesi öngörülmüştür. Tersine mühendislik işleminin aşamaları hakkında detaylı bilgi sıradaki bölümde verilecektir. Endüstriden alınan örnek parçaların taranması,

parçalara 3D CAD programlarında tersine mühendislik işlemleri uygulanarak CAD verilerinin elde edilmesi de sonraki kısımlarda anlatılacaktır.



2. TERSİNE MÜHENDİSLİK

Tersine mühendislik fiziksel modellerden geometrik modellerin oluşturulması, mevcut bir parçanın yeniden tasarlanması ve boyutlarının analizi için sistematik bir yaklaşımdır (Eren vd., 2018). Tersine mühendislik, ürünün üretim süreçleri de dahil olmak üzere özelliklerinin ve ürünü oluşturan bileşenlerin birbirleri ile olan ilişkisinin analiz edilmesi olarak da tanımlanmaktadır (Chikofsky vd., 1990; İşbilir F. vd.'den, 2018). Tersine mühendislikte amaç, ortada hiçbir CAD model yok iken, bir nesnenin gelecek çalışmalarda kullanılmak üzere başarılı bir şekilde 3D CAD modelini oluşturmaktır (Şahin vd., 2017). Tersine mühendislik; CAD dataları olmayan parçaların üretilmesi, uzun süre kullanım sonucu yıpranan ya da hasar gören parçaların tamiri ya da yeniden üretilmesi, CAD dataları mevcut parçalar üzerinde yenilik veya düzeltmeler yaparak yeni parçaların ortaya çıkarılması, seri üretimine başlanacak parçaların kalite kontrolünde yararlanılması gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Tersine mühendislik makine, yazılım sektörü, arkeoloji, tarihi ve sanatsal eserler, eğlence sektörü, biyomedikal, tıp, diş hekimliği, tekstil gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de bir tarihi eserin tarama verisi, Şekil 2.2'de bir parmak izinin tarama verisi görülmektedir. Tersine mühendislik için basit ölçme teknikleri bile yeterli olurken teknolojiadaki hızlı gelişmeyle birlikte 3 boyutlu ölçmede temassız yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu da çalışmaların daha hızlı bir şekilde yapılmasını sağlamıştır.



Şekil 2.1. Tarihi Yarımada'daki sarnıçlı nokta bulutu verisi (Benli vd., 2017).



Şekil 2.2. Parmak izine ait tarama verisi han (<http://www.tulga.com.tr>).

Tersine mühendislik yaklaşımı endüstride aşağıdaki amaçlara yönelik kullanılabilir (Yuan vd., 2001; Eren vd.' den, 2018).

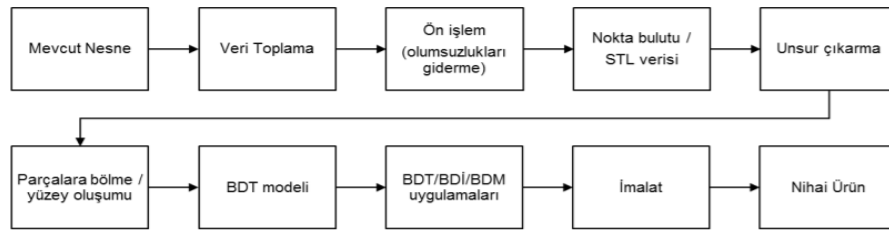
- Yeni bir bileşenin tasarımı: Mevcut katı parça tarama verisi ile yeni parçaların tasarımı.
- Var olan bir bileşenin çoğaltılması: Hiçbir tasarım / imalat dokümantasyonu bulunmayan parça/bileşenin kopyası tersine mühendislik yaklaşımı ile elde edilebilir.
- Hasar görmüş veya kırılmış bir bileşenin düzeltilmesi: Parçanın yüzeyi hasar görmüş veya yıpranmışsa tersine mühendislik ile hassas CAD modeli yüksek doğrulukta elde edilebilir ve hasarlar düzeltilebilir.
- Model hassasiyetinin geliştirilmesi: Mühendis, işlev ve estetik gereksinimlerine dayalı bir ürünün kavramsal tasarımını tamamlayabilir ve ardından modelleri imal etmek için ahşap veya alçı gibi bazı yumuşak malzemeler kullanabilir. Bu katı modeller tersine mühendislik uygulamaları ile CAD verisine dönüştürülerek özel tasarım parçalar oluşturulabilir.
- Sayısal verilerin gözlenmesi: Parçayı tarayıp tersine mühendislik yaklaşımıyla 3B CAD modelini yeniden yapılandıran tasarımcı, bu modeli ilk modelle karşılaştırabilir.

Tersine Mühendislik İşleminin Aşamaları;

- Mevcut modelin geometrik verileri tarama cihazlarıyla alınır, veriler düzenlenir.
- Elde edilen nokta bulutuna; istenmeyen verileri çıkarma, noktalar arası mesafeyi düzenleme, nokta boyutunu azaltma gibi işlemler uygulanarak mesh (‘.stl’) yapı elde edilir.
- Mesh (‘.stl’) yapıda da düzenleme işlemleri (mesh boyutunun küçültülmesi, pürüzlü yüzeylerin pürüzsüzleştirilmesi vb. gibi) uygulanır.
- Mesh yüzeyleri, uygun geometrik şekillerle kaplanarak ya da meshten alınan kesit çizgilerinden faydalanılarak oluşturulur.

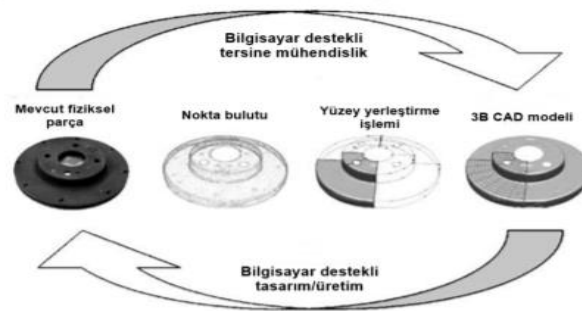
- Modelin parçaları ve oluşturulan yüzeylerdeki eksiklikler tamamlanarak BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) model oluşturulur.
- BDT modeli kullanılarak, BDİ (Bilgisayar Destekli İmalat) ve BDM (Bilgisayar Destekli Montaj) çalışmaları yapıp ürün imalata hazırlanır ve imal edilir.

Tersine mühendislik işlem basamakları Şekil 2.3'te görüldüğü gibidir.



Şekil 2.3. Tersine mühendislik işlemlerinin genel akış şeması (Kumar, vd., 2013; Türkücü ve Börklü' den, 2018; Ye vd., 2008; Türkücü ve Börklü' den, 2018).

Tersine mühendislik işleminin veri toplama adımı, parça yüzeyi boyunca noktalar üzerinden ölçüm yapılır. Her nokta, 3 boyutlu uzayda konumunu belirten bir x, y ve z koordinatına sahiptir. Belirli bir nesne için, tersine mühendislik sistemi nesnenin niteliğine ve tersine mühendislik sisteminin türüne bağlı olarak binlerce nokta verisi toplar. Toplanan bu noktalar, nokta bulutu olarak adlandırılır. Çoğu uygulamada nokta bulutu, nesnenin yeterli bir açıklamasıdır. Ancak parçanın katı modelini elde etmek için tersine mühendislik uygulamaları ile nokta bulutları üzerine uygun yüzeyler yerleştirilir. Böylece fiziksel parçaya ait 3B CAD verisi elde edilmiş olur (Eren vd., 2018). Bilgisayar destekli tersine mühendislik süreci özetle Şekil 2.4'teki gibidir.



Şekil 2.4. Bilgisayar destekli tersine mühendislik süreci (Raja, vd., 2008; Eren vd.'den, 2018).

2.1. Ölçme

Ölçme ya da ölçüm, bilinmeyen bir büyüklüğün aynı türden olan, ancak bilinen bir büyüklükle kıyaslanmasına denir. Diğer bir deyişle, bir uzunluğun, bir alanın, bir kapasitenin veya herhangi bir olgunun belirli bir birim cinsinden hesaplanmasıdır (tr.wikipedia.org /wiki/ölçme).

Üretilen makine, makine ekipmanları ve diğer ürünler belirlenen standartlarda olabilmesi için takip ve kontrol edilmelidir. Takip ve kontrol için çeşitli ölçüm cihazları ve ölçüm sistemleri kullanılır.

Teknolojideki gelişmeyle birlikte üretilen ürünlerin formları daha karmaşık hale gelmiş yeni ölçüm teknik ve sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda sürekli gelişen ölçüm cihazları ve sistemleri, kullanıcıların mevcut tüm özelliklerin avantajlarından yararlanmalarına olanak sağlamıştır. Birçok ölçüm sisteminin teknik özelliklerinde, çözünürlük ve tekrarlanabilirlik gibi parametrelerden bahsedilir; doğruluk ise bu parametrelerin en önemlisidir.

Doğruluk veya bazı durumlarda adlandırıldığı gibi hata, ölçülen belirli bir miktarın ölçüm sonucu ile gerçek sonucu arasındaki yakınlığı ifade eden bir terimdir. Gerçekte, ölçülen miktarın gerçek değerini hiçbir zaman bilemeyiz. Bu nedenle, ölçülen miktarın kesinliğinin önemli olduğu birçok durumda, en azından ölçüm cihazının doğruluğunun optimum düzeyde olması üzerine yoğunlaşılır (<https://www.faro.com/tr-tr/resources/makaleler/>). Klasik yöntemle ve bilgisayar yardımıyla ölçü almayı sağlayan ölçüm alet ve cihazı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Ölçüm aleti ve cihazı.

2.2. Veri Toplama Teknikleri

Günümüzde üretilen ürünler geçmiştekilere göre daha karmaşık yapıya sahiptir. Otomotiv sektörü için fiziksel görünümünden iç özelliklere kadar karmaşık yapıya sahip birçok ürün bilgisayar ortamında yüzey modelleme kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu karmaşık yapıya sahip ürünlerin klasik ölçüm aletleri ile ölçülmesi zor olduğundan bu ürünlerin ölçümünde optik ölçüm cihazlarından faydalanılır.

3 boyutlu ölçme sistemleri temaslı ve temassız (dokunmalı ve dokunmasız) olmak üzere iki gruba ayrılır. CMM ve mekanik kolla ölçüm yapan mekanizmalar temaslı (dokunmalı) grubu oluşturur. Bu mekanizmalarda x, y ve z ekseninde hareket edebilen kol mevcuttur, kolun ucunda ölçümü yapılacak parça ile temas eden bir cihaz bulunmaktadır. Bu cihaz prob olarak adlandırılır. Parça üzerinde koordinatlarının belirlenmesinin istenildiği yere prob ile temas edilir, prob temas ettiği yerin verilerini bilgisayar ekranına aktarır böylece ölçüm yapılan yerin koordinatları elde edilmiş olur. Temaslı sistemlerde yüzeyde istenilen bölgelerin koordinatları çıkarılırken yüzeye dair verilere ulaşılması mümkün değildir (www1.mmo.org.tr/). Şekil 2.6'da CMM ve Mekanik kolla ölçüm yapan sistemler görülmektedir.



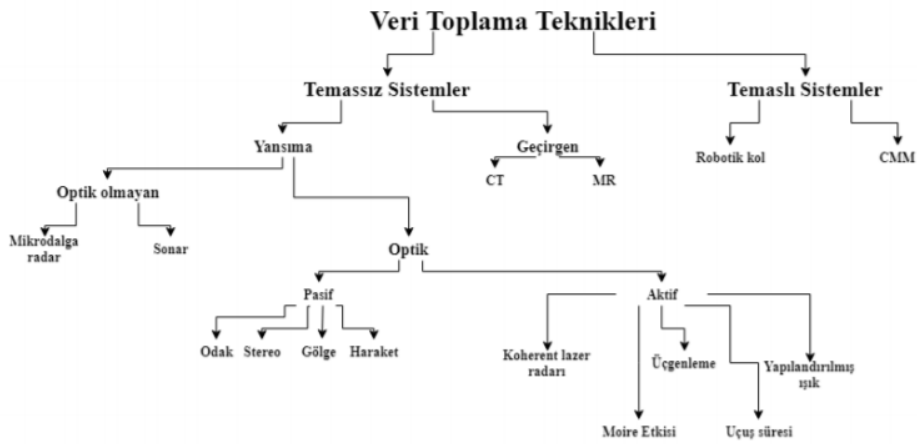
Şekil 2.6. CMM ve mekanik kollu sistem.

Temassız 3D taramacılar, adından da anlaşılacağı gibi, bir nesne yüzeyi ile fiziksel temas kurmaz. Bunun yerine, temassız 3D taramacılar bir nesneyi taramak için bazı aktif veya pasif teknikler kullanır. Tarama sonucu oldukça hassas bir nokta bulutu elde edilir. Elde edilen nokta bulutu tersine mühendislik, sanal montaj, mühendislik analizi gibi alanlarda kullanılır (Abdel ve Bary, 2015).

Bir model veri toplama işleminde sayısallaştırma yapılırken aşağıdaki faktörler göz önüne bulundurulmalıdır (Berbercuma, 2006; Demir, 2018'den).

- 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.

3D veri toplama yöntemleri temelde Temassız Sistemler ve Temaslı Sistemler olarak ikiye ayrılır (Şekil 2.7.)



Şekil 2.7. Tersine mühendislik uygulamalarında veri toplama.

2.2.1. Temaslı veri toplama yöntemleri

Temaslı 3D tarayıcıları genellikle sabit bir platformda çalışacak şekilde kalibre edilmiş mafsallı bir mekanik kolun ucunda bulunan bir prob içerir. Kol, parçanın yüzeyi üzerinde robotik veya manuel olarak yönlendirilebilir. Prob nesnenin yüzeyine temas ettiğinde tarayıcı, armatürün konumsal ölçümlerini alarak probun X, Y, Z konumunu kaydeder. Kaydedilen pozisyonlar 3B kafesi hesaplamak için kullanılacak nokta bulutu oluşturur. 3D temaslı tarayıcılar yavaş tarama hızlarından muzdariptir ve fiziksel temas yüzeye zarar verebileceği veya şekli bozabileceği için değerli sanat eserleri gibi hassas nesnelere için ideal olmayabilir (Abdel ve

Ebrahim, 2015). Şekil 2.7’de yer alan şemadan da görüleceği üzere temaslı veri toplama sistemleri robotik kol ve koordinat ölçüm makineleri (CMM) olmak üzere ikiye ayrılır.

Robotik kol

Parça yüzeyinden ölçüm almak için kullanılan probun bulunduğu noktayı belirlemek için ana gövdeye bağlı hareketli kol kullanılır. Şekil 2.8’de veri toplamak için kullanılan robotik kolun görüntüsü verilmiştir. Parça yüzeyine temas eden probun ölçtüğü değerleri okuyabilmek için hareketli kolun her bir parçasının niteliği (uzunluk, kaç derece döndüğü vb.) bilinmelidir. Ölçüm yaparken hareketli kollarla ulaşılabilen noktalar 610-180 mm aralığındadır. Dönebilen optik kodlayıcılar ile hareketli kolun her bir parçası için dönme açıları belirlenir. Hareketli kollar çok eksenli olduğundan, ölçümü yapılacak parça üzerinde farklı nokta ve açılardan kolaylıkla ölçüm alınabilir (www.faro.com).



Şekil 2.8. Veri toplamada kullanılan robotik kol (www.faro.com).

Koordinat ölçüm makineleri

İlk CMM, makinenin XYZ konumunu görüntüleyen, bir dijital değer okunduğu basit bir cihaz olarak 1960’lı yılların başında üretilmiştir.

Klasik CMM tipleri köprü, destek ve rampa bileşenleri içerir. Şekil 2.9’da klasik bir CMM makinesi görülmektedir. Sabit CMM’ler çok yüksek hassasiyet düzeylerine sahiptir ve CAD modeline bir bağlantı sağlar. Ancak ölçülecek parçanın (tipik olarak sıcaklığı kontrol edilen bir odada duran) CMM’e getirilmesini ve parçanın CMM ölçüm ızgarasına sığmasını gerektirmektedir. Üretilen alt tertibatlar boyut olarak büyüdüğünden ve daha büyük tertibatlara

entegre edildiğinden, taşınabilirlikleri azalmış ve bu nedenle klasik bir CMM'nin kullanım alanlarını sınırlamıştır (www.faro.com).

CMM cihazının çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir: Parçaların ölçülecek unsurları, koordinat ölçüm cihazında farklı yerlerden noktalar alınarak veya yüzey taraması yapılarak oluşturulur. Parçaların geometrik unsurlarının matematiksel hesaplamaları ise parça üzerinden alınan koordinat bilgileri ile koordinat ölçüm cihazının işlemcisi tarafından yapılır. Ölçme noktalarının geometrik olarak oluşturulacak unsur için gerekli asgari sayıdan fazla olması halinde ölçüm sonuçlarının hesaplanması için değişik filtreleme metotları kullanılır. Ölçümü yapılan unsurların boyut değerleri, şekil sapmaları ve geometrik elemanların arasındaki konum sapmaları koordinat ölçme tekniği ile elde edilir (Weckenmann, 2011: Işık'tan, 2019).



Şekil 2.9. Veri toplamada kullanılan CMM makinesi (www.hexagonmi.com).

2.2.2. Temassız veri toplama yöntemleri

Temassız veri toplama araçları, parça yüzeyine temas etmeden parça verilerini alabilen araçlardır. Temassız veri toplama yönteminde ışık, ses ve manyetik alandan yararlanılır. Prob ucu ile temas edildiğinde iyi sonuç alınamayacak kadar yumuşak ve esnek parçalar ya da prob ucu ile temas edildiğinde hasar görmesini istemediğimiz tarihi eserler gibi ürünlerin verilerini alırken kullanabileceğimiz sağlıklı bir yöntemdir. Şekil 2.10'da tarama parçası, optik tarama cihazı ve tarama işlemi görülmektedir. Bu sistemlerde yüzey formu çok yüksek hassasiyetlerde elde edilir (www1.mmo.org.tr). Şekil 2.11'de tarama işlemi ile elde edilen nokta bulutu, nokta bulutundan faydalanılarak elde edilen meshli yapı ve tersine mühendislik işlemleri sonucu elde edilen CAD yapı verilmiştir.



Şekil 2.10. Tarama parçası ve tarama işlemi (Şahin vd., 2017).



Şekil 2.11. Tarama ile elde edilen nokta bulutu, STL yapı ve sonuç olarak ulaşılan CAD yapı (Şahin vd., 2017).

Optik yöntemler

Optik tarama cihazları belirli bir yüzeyi tarayarak yüzeye ilgili bilgi toplamaktadır. Toplanan bilgi nokta bulutu şeklindedir. Bu elde edilen nokta bulutu, taraması yapılan yüzey hakkında yorum yapılabilmemizi sağlar. Tarama işleminden sonra kullanılan data ile numunenin geometrik özelliklerini tespit ve kontrol edebiliriz. Ayrıca elde edilen nokta bulutu ile numunenin üç boyutlu modeli oluşturulabilmektedir (Işık, 2019). Optik yöntemler, diğer yöntemlere göre daha hızlı veri toplanmasını sağlar bu nedenle kullanımı giderek artmaktadır.

Bir objenin ya da objenin belirli bir bölümünün yüzey verileri temassız ölçüm aleti olan optik tarayıcılarla elde edilir. Bu obje ya da bölümün alanı 100-1000 milimetrekare arasındadır. 3 boyutlu optik tarama cihazları kolay kullanım özelliklerinden dolayı kompleks sistemlerde rahatça kullanılabilir. 3 boyutlu optik tarama cihazlarında ışık projeksiyonları kullanılır. Tarama cihazlarında kullanılan diğer eleman kameradır. Bu kameralar ışık projeksiyonları ile oluşturulan farklı görüntüleri alır ve obje üzerindeki bölgelerin koordinatlarının oluşumunu sağlar. Optik tarama cihazlarında kullanılan kameraların pikselleri ile ölçüm sonucu oluşacak nokta sayısı doğru orantılıdır. 2 megapiksel kameraya sahip cihazla tarama sonucu 2 milyon nokta elde edilebilirken 6 megapiksel kameraya sahip cihazla 6 milyon nokta elde edilir. Ölçümlerinde ışık projeksiyonu kullanan 3 boyutlu optik tarayıcılar, ölçümün çok küçük bir toleransla yapılmasının gerekli olduğu yerlerde yüksek hassasiyetle ölçüm yapar. 3 boyutlu optik tarayıcılar aynı zamanda

parça yüzeyi hakkında veri toplanmasına olanak sağlar (www.faro.com/tr-tr/resources/makaleler).

Optik Taramanın Avantajları

1. Parça ve sistem proje süresince hareket ettirilebilir.
2. Konfigürasyonuna göre en yüksek çözünürlüklü veri bu yöntemle elde edilebilir.
3. Birkaç milimden metrelere büyüklüğe kadar parçalar aynı sistem ile taranabilir.
4. Tarama hassasiyetleri çok yüksektir.
5. Çalışma şartları esnekler.
6. Elde edilen datalar tersine mühendislik ve kalite kontrol alanlarında kullanılabilir (www.poligonmuhendislik.com).

Lazer teknolojisi alanındaki araştırmalar, 1960 yılından bu yana 60 yılı geçkin bir tarihe sahiptir. Tek renklilik, iyi kolimasyon, yüksek güç, kısa atımlar veya lazer ışığının ayarlanmasının muhtemelliği gibi lazer radyasyonunun belirli niteliklerinden dolayı ölçümler için kullanılan bu teknolojinin avantajı, günümüzde kullanımını arttırmaktadır. Lazer tarama teknolojileri; hızlı ve minimum giderle, neredeyse taranmak istenen tüm modeller hakkında eksiksiz 3 boyutlu geometrik ve görsel bilgiye ulaşmayı sağlamaktadır (Gümüş ve Erkaya, 2007).

Lazerli tarama cihazları, taranan parça üzerinde noktaları yakalamak için önce yüksek performanslı bir lazer nesnenin yüzeyine bir ışın gönderir, ardından kamera bu ışına bakarak noktanın konumunu belirler. Lazer şerit, saniyede 45.000 noktayı tarayarak, kullanıcıların yüksek miktarda nokta bulutu verisini hızlı ve kolay bir şekilde kayıt altına almalarını ve parçalarının başka bir yolla asla fark edemeyecekleri yönlerini keşfetmelerini mümkün kılmak üzere veri yakalar. Tarama olarak da adlandırılan bir nokta bulutu, dengeli olarak aralıklandırılmış bir grid üzerinde milyonlarca noktayı içerir (www.faro.com/).

Suç mahalli, bina cepheleri, tarihi mekanlar veya karmaşık boru tesisatları gibi geniş alan ya da nesne taramalarında büyük hacimli lazerli tarayıcılar kullanılır. Büyük hacimli lazerli tarayıcılar, şerit mezura, optik tarama cihazları, dijital kamera gibi geleneksel ölçüm yöntemleri ile karşılaştırıldığında, daha hızlı, daha kolay ve daha ekonomik olarak milyonlarca 3D veri noktası elde etmeyi sağlar.

Yüksek hacimli lazerli tarayıcıların uygulama alanlarından bazıları şu şekildedir:

- Tesis Yönetimi: Genel tesis yönetim ve tadilat projeleri için 3D dokümantasyon sağlama (Şekil 2.12),



Şekil 2.12. Tesis yönetimi için lazer tarama.

- Adli Tıp/Olay Yeri İncelemeleri: Mermi/kan yolu yakalama, suç mahalli analizine yönelik kapsamlı delil toplama (Şekil 2.13),



Şekil 2.13. Olay yeri inceleme için lazer tarama (www.officer.com).

- Kaza Yeniden Kurgulama: Neden sonuç analizi için veya mahkemede kullanmak amacıyla 3D modeller oluşturma (Şekil 2.14),



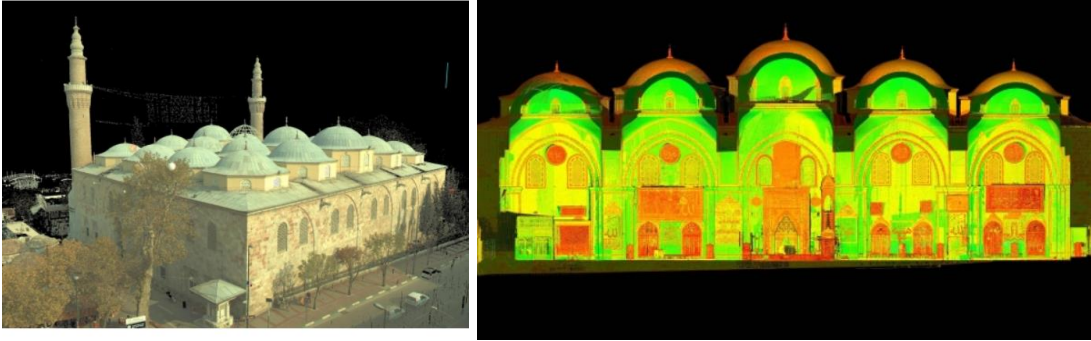
Şekil 2.14. Kaza yeniden kurgulama için lazer tarama.

- Mimari/İnşaat Mühendisliği: Mevcut binalar için uygulama dokümantasyonu yakalama veya bina bilgi modellerinde (BIM) kullanmak üzere 3D modeller geliştirme, köprü gibi yapıların yeniden inşası ya da restorasyon çalışmalarında (Şekil 2.15),



Şekil 2.15. İnşaat sektörü için lazerli tarama (tr.pinterest.com).

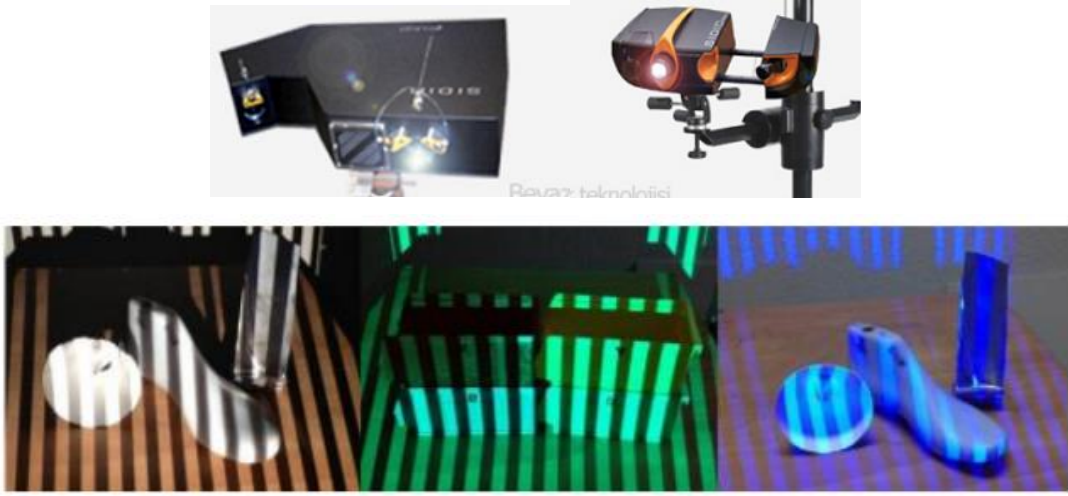
- Kültürel Miras: Şekil 2.16'da görüldüğü gibi tarihi anıtların korunması, restorasyonu ve dokümente edilmesi için mevcut koşulların belgelendirilmesi (www.faro.com/).



Şekil 2.16. Bursa Ulu Camii için yapılmış lazerli tarama.

3D tarama sistemleri, bir ışık kaynağını bir malzeme parçasına yansıtma ve ortaya çıkan milyonlarca fotoğraf makinesinin yansıyan ışıkla fotoğraf işleme sürecinin sayısallaştırılması işlemidir (Yalçınkaya vd., 2019). Sayısallaştırma işlemi sonucu elde edilen veriler birçok noktanın yan yana dizilmesiyle oluşur ve buna nokta bulutu adı verilir. STL, OBJ, PLY, WRL en çok kullanılan veri formatlarıdır.

Beyaz ışık optik tarama cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Beyaz ışık yerine farklı renklerde ışıklarla tarama yapan optik tarama cihazları da mevcuttur. Farklı renklerle yapılan taramalarda, taranan nesnenin renginin tarama sonuçlarını etkilediği gözlemlenmektedir. Beyaz ışıkta ise taranan nesnenin renginin tarama sonuçlarını değiştirmedeği görülmektedir. Yapılan bir çalışmada farklı renklerde nesnelere beyaz, mavi ve yeşil ışıkla taranmıştır (Şekil 2.17). Beyaz ışıkla yapılan taramalarda, taranan nesnenin renginin tarama sonuçlarını değiştirmedeği görülmüştür. Mavi ve yeşil ışıkla yapılan taramalarda, kırmızı renkli nesnenin taranmasında önemli ölçüde farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Mavi ve yeşil ışıkla yapılan taramalarda, her ışığın kendi rengindeki nesnede en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Tarama yapılması zor olan nesnelere (yüzeyi parlayan, ışığı yansıtan) beyaz ışıktan farklı bir renkte tarama yapıldığında daha iyi bir sonuca ulaşılmadığı anlaşılmıştır (Ören vd., 2014).



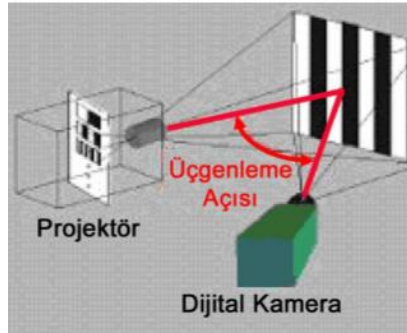
Şekil 2.17. Farklı renlerde yapılan tarama.

Dokunmasız optik tarama sistemlerinden yapıları ışık desenli 3D optik tarama sistemlerinin değişik dizayn tipleri mevcuttur. Tek kameralı, çift kameralı, asimetrik çift kameralı sistemler gibi. Şekil 2.18’de tek, çift ve asimetrik kameralı sistemlerin görüntüsü verilmiştir. Tüm bu sistemlerde güçlü bir halojen ışık kaynağı ile cismin üzerine farklı dokusal özellikleri olan fringe’ler düşürülür.



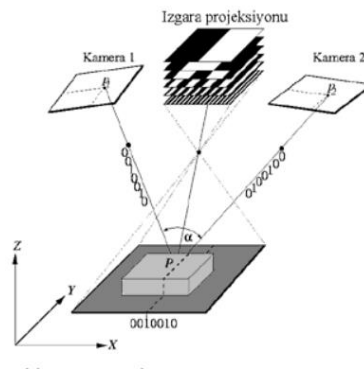
Şekil 2.18. Tek, çift ve asimetrik kameralı optik tarama cihazları.

Tek kameralı optik tarama cihazlarında, kamera ile ışık kaynağı belli bir açıya göre konumlandırılmıştır. Şekil 2.19’da tek kameralı optik cihazın çalışma prensibi gösterilmiştir. Işık kaynağı ile kamera arasındaki açıya üçgenleme açısı denir. Optik tarama cihazlarında, yüksek çözünürlükteki CCD (Charge Coupled Device) kameralar vasıtasıyla çeşitli açılardan elde edilen görüntüleri gelişmiş fotogrametri tekniklerini kullanan özel bir yazılım ile IGES ve STL gibi üç boyutlu standart veri formatlarına dönüştürür (www.olymposdesign.com).



Şekil 2.19. Tek kameralı optik cihaz sistemi (Demir, 2018).

Çift kameralı optik tarama cihazlarında, kenarlara yerleştirilmiş iki kamera ile ortaya yerleştirilmiş bir adet ışık kaynağı bulunur (Şekil 2.20). Çift kameralı optik tarama cihazlarında, üçgenleme açısı, iki kamera arasındaki açıdır. Doğruluk açısından en önemli olan bu parametre büyüdükçe doğruluk artmaktadır. Ancak, bunu limitleyen diğer bir parametre ise gölge etkisidir. Gölge etkisi, derin delik ve ceplerin sistem tarafından görülemiyor olmasıdır. Genel olarak tarayıcı sistemlerde üçgenleme açısı, 30 derece civarındadır. Kamera çözünürlüğü ise her geçen gün meydana gelen teknolojik gelişmelerle artan bir parametre olmuştur. Bir taramada alınabilecek toplam nokta sayısı, tamamen kamera çözünürlüğü ile alakalı bir konudur. Bunu kısıtlayan faktör ise çözünürlüğün artması ile piksel boyutunun küçülmesi ve dolayısıyla gürültü seviyesinin artmasıdır. Objektiflerin kalitesi ise özellikle kalibrasyon sürecinin kalitesini belirlemektedir. Artan objektif kalitesi ile alınan görüntüdeki distorsiyonlar azalır. Günümüzde bunları bertaraf edebilecek özel olarak tasarlanmış kalibrasyon metotları geliştirilmiştir (Ören vd., 2014).



Şekil 2.20. Çift kameralı optik cihazların sistemi (www.olympusdesign.com).

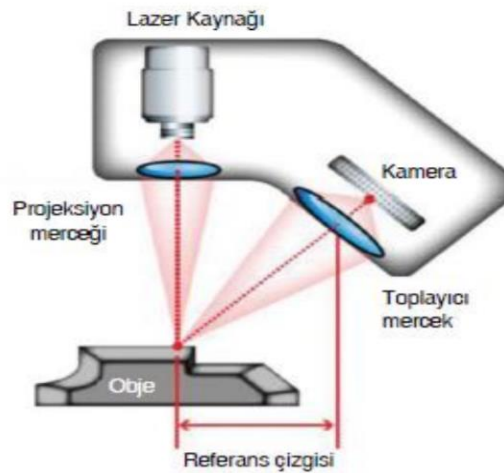
Optik yöntemlerin sınıflandırılması

Optik tarama sistemleri farklı çalışma prensiplerine göre sınıflandırılabilirler. Sistemler temel düzeyde aktif tarama sistemleri ve pasif tarama sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır (Işık, 2019).

-Aktif tarama sistemleri

Aktif tarama sistemleri tarama esnasında cisim üzerine yansıtılmak üzere bir ışık kaynağı kullanan sistemlerdir (Işık, 2019). Aktif tarayıcılar bir tür radyasyon ışığı iletir ve gerçek dünyadaki bir nesneyi veya ortamı araştırmak ve keşfetmek için alıcıları ile nesneden yansıyan ışığı algılar. Bu tür tarayıcılar genellikle ışık, ultrason veya X-ışını yayar (Bakhshi, 2011). Aktif tarama sistemleri lazer üçgenleme, uçuş zamanı, interferometre gibi üç kategoride incelenebilir.

Lazer Üçgenleme: Bir üçgenleme 3D lazer tarayıcı, nesnelerin ortamını ve yüzeyini araştırmak için ışık huzmesi yayan temassız aktif bir tarayıcıdır. Bu tip lazer tarayıcı, bir kamera ve lazer yayıcı sisteminin bir kombinasyonundan oluşur. Şekil 2.21’de lazer üçgenleme metodu kullanan tarama cihazı verilmiştir. Lazer sistemi görünür lazer ışınını taranacak modelin yüzeyine yayar ya da yansıtır. Daha sonra kamerayı, lazer ışınının nesne veya lazer noktası üzerindeki konumunu tespit ve tahmin etmek için kullanır. Yüzey ve lazer sistemi arasındaki mesafeye bağlı olarak, lazer noktası kameranın görüş alanındaki farklı yerlerde ortaya çıkar ve görüntü verir. Lazer yayıcı ve lazer noktası ve kamera üçgenin üç köşesini oluşturduğundan bu yöntem üçgenleme olarak adlandırılır (Bakhshi, 2011).



Şekil 2.21. Lazer üçgenleme metodu (Yıldız, 2017).

Lazer üçgenleme yöntemi ile çalışan tarayıcıların çözünürlüğünü, algılayıcı ile lazer arasındaki üçgenleme açısı belirlemektedir. Düşük açılarda çözünürlük düşerken, ölçüm alınabilen uzaklık artmaktadır. Büyük açılarda ise yüksek çözünürlükte ölçümler alınırken çalışma uzaklığı kısalmaktadır. Yakın mesafelerde lazer üçgenleme yöntemi, mikrometrenin alt mertebelerinde doğruluklara ulaşabilmektedir (Ören, 2013).

Lazer üçgenleme yöntemi ile ölçüm yapan sistemler, CMM'lerde dokunmatik problemlerle yapılan ölçümlere kıyasla, bir seferde alınan toplam nokta sayısı, ölçüm hızı ve otomasyona yatkinlik gibi avantajlar sağlar (Ören, 2013).

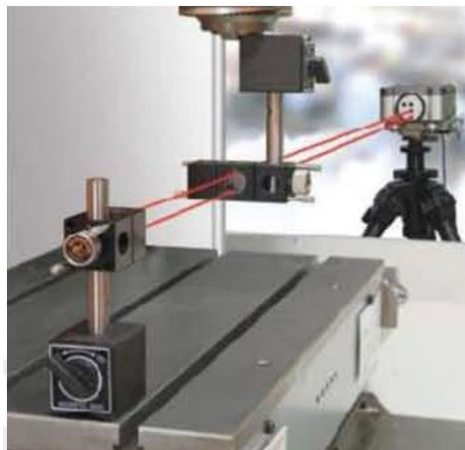
Uçuş Süresi: Uçuş süresi tabanlı tarama sistemleri genellikle lazer ışını ile çalışan aktif tarama sistemleridir. Şekil 2.22'de uçuş süresi metodunu kullanan cihazlar gösterilmiştir. Yüzeyin üzerine yansıtılan lazer ışınının cihazdan çıkışından itibaren geri gelişine kadar geçen süreyi ölçerek uzunluk bilgisine çeviren sistemlerdir (Işık, 2019). Bu tür sistemin kalbinde uçuş süresini tespit eden lazer telemetre bulunur. Lazer telemetre, bir ışık atımının gidiş-dönüş süresini zamanlayarak bir yüzeyin mesafesini bulur. Gidiş geliş süresinin yarısı cisim ile lazer kaynağı arasındaki uzaklıktır (Abdel ve Ebrahim, 2015).

Lazer telemetre yalnızca bir noktanın görüş yönündeki mesafesini algılar. Böylece tarayıcı, farklı noktaları taramak için telemetre bulucunun görüş yönünü değiştirerek tüm görüş alanını teker teker tarar. Lazer telemetrenin görüş yönü, telemetrenin kendisi döndürülerek veya bir döner ayna sistemi kullanılarak değiştirilebilir. İkinci yöntem yaygın olarak kullanılır, çünkü aynalar çok daha hafiftir ve bu nedenle çok daha hızlı ve daha hassas bir şekilde döndürülebilir. Tipik uçuş süresi tabanlı 3D lazer tarayıcılar saniyede 10.000 ~ 100.000 nokta arasındaki mesafeyi ölçebilir (Abdel ve Ebrahim, 2015).



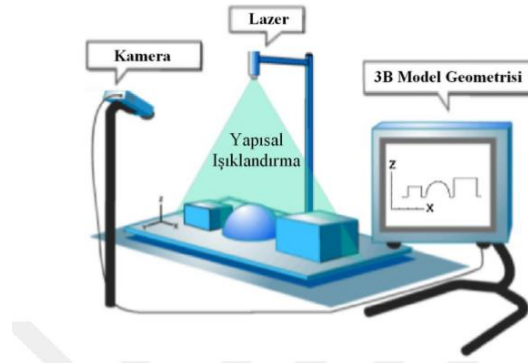
Şekil 2.22. Uçuş süresi metodu kullanan cihazlar (www.hexagonmi.com, www.poligonmuhendislik.com, www.faro.com).

İnterferometre: Bu yöntem uzaklığı, dalga boyu cinsinden hesaplar. Oldukça hassas bir yöntemdir çünkü gözle görülebilen ışık, yüz nanometreler büyüklüğünde olmasına rağmen, diğer tersine mühendislik uygulamalarında uzaklıklar santimetre ve metreler hassasiyetindedir (Yıldız, 2017). İnterferometre ile ölçüm mesafesi daha hassas olmasına rağmen, ölçüm aralığı küçüktür. Ölçülen mesafe ile ilgili belirsizlik ol çünkü maksimum aralığın üzerindeki mesafenin artırılmasıyla faz periyodik olarak değişecektir (Abdelhafiz, 2009: Abdel ve Ebrahim'den, 2015). Belirsizlik iki farklı modülasyon frekansı ile ölçülerek kolayca giderilebilir. Her iki ölçüm kanalından faz farklılıklarının frekans seçici hesaplaması ile kesin bir aralık ölçümü elde edilebilir (Fröhlich, vd.,2000: Abdel ve Ebrahim'den, 2015). İnterferometre tarayıcıların tarama hızı uçuş tarayıcılarının zamanından daha hızlı olmakla birlikte, interferometre tarayıcıların uçuş zamanı yöntemini kullandıklarından daha gürültülüdür yine de tarayıcılardan kaynaklanan nokta bulutları faz farkı yöntemini kullanır (Mechelke, vd., 2007: Abdel ve Ebrahim'den, 2015). Uçuş zamanı yöntemini kullanan tarayıcıların ölçüm aralığı (200-300m) interferometre yöntemini kullanan tarayıcıların ölçüm aralığından daha uzundur (70-80m) (Abdel ve Ebrahim, 2015). Prensipte, elektromanyetik spektrumların diğer bölümlerinden de yararlanılabilmektedir. Pratikte, hem objeyi algılamada kullanılan monokromatik ışın için hem de yansıyan ışık ile karşılaştırmak üzere referans ışını sağlamak için yüksek enerjili ışık kaynağı kullanılmaktadır (Yıldız, 2017). Bu yöntem astronomi, fiber optik, metroloji, sismoloji, plazma fiziği gibi birçok farklı alanda uygulanan bir yöntemdir. Şekil 2.23'te gösterildiği gibi takım tezgâhlarının lineer ve açılmal hatalarının ölçülmesinde kullanılan yöntem de lazer interferometredir (Ören vd., 2014: Demir, 2018).



Şekil 2.23. Lazer interferometre ile takım tezgâhları doğrusal hataların ölçümü (Ören vd., 2014: Demir'den, 2018).

Yapısal Işıklandırma: Işık paternlerini ilgili yüzeye yansıtarak, bu yüzeyden geri yansıyan ışınların oluşturduğu paternleri yakalayıp görüntü oluşturmayı içermektedir (Şekil 2.24). Bu görüntü, daha sonra yüzeydeki veri noktalarının koordinatlarını hesaplayabilmek için analiz edilmelidir. Yapısal ışıklandırma yöntemlerinden en popüler olanı Shadow Moire'dir (Yıldız, 2017).



Şekil 2.24. Yapısal ışıklandırma sistemi (Demir, 2018).

Yapısal ışıklandırma tarayıcılar, modelin üzerine çizgisel bir ışık yansıtarak, model üzerinde ışığın oluşturduğu çizgisel desen verisinin birbirinden farklılık durumuna bakar. Desenli projektörden biraz uzak duran bir kamera, çizginin şekline bakar ve çizgi üzerindeki her noktanın mesafesini hesaplamak için üçgenleme metoduna benzer bir teknik kullanır. 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. Şekil 2.25'te yapısal ışıklandırma yöntemiyle yapılan tarama gösterilmiştir (Demir, 2018).



Şekil 2.25. Yapısal ışıklandırma metoduyla tarama.

-Pasif tarama sistemleri

Pasif tarama sistemleri ise tarama esnasında ortamın ışığını kullanarak çalışan sistemlerdir (Işık, 2019). Pasif tarayıcılar herhangi bir radyasyon yaymazlar, bunun yerine yansıyan ortam radyasyonunu tespit etmeye güvenirlir. Bu tür tarayıcıların çoğu görünür ışığı algılar, çünkü kolayca elde edilebilen bir ortam radyasyonudur. Kızılötesi gibi diğer radyasyon türleri de kullanılabilir. Pasif yöntemler çok ucuz olabilir, çünkü çoğu durumda belirli bir donanıma değil basit dijital kameralara ihtiyaç duyarlar. Pasif temassız 3D tarayıcılar arasında stereoskopik video tarayıcılar, fotometrik tarayıcılar, Silhouette tarayıcılar ve görüntü tabanlı modelleme tarayıcıları bulunur (Abdel ve Ebrahim, 2014).

Stereo Tabanlı Sistemler: Stereo tabanlı tarama sistemleri çift kamera kullanılarak 3 boyutlu data elde edilmesi üzerine çalışan sistemlerdir (Işık, 2019). 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 (Abdel ve Ebrahim, 2015). Her kamera tarafından görülen görüntüler arasındaki ufak farklılıkları analiz ederek, görüntülerdeki her noktada muhtemel mesafe belirlenir. Bu yöntem, insan stereoskopik vizyonunu yönlendiren prensiplere dayanmaktadır (Yalçinkaya vd., 2019).

Fotogrametrik Sistemler: Fotogrametrik sistemler genellikle tek bir kamera kullanırlar, değişen aydınlatma koşullarında Şekil 2.26'da görüldüğü gibi birden fazla görüntü alırlar (Yalçinkaya vd., 2019).

Alınan görüntüler üzerinde kontrol ve bağlama noktaları işaretlenmesi sonrasında eşleştirme işlemi için bir fotoğraf referans olarak seçilir ve her bir noktanın yeri diğer fotoğraflarda 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 (Demir, 2018). Şekil 2.27'de fotogrametri yöntemi kullanılarak elde edilen CAD model verilmiştir.



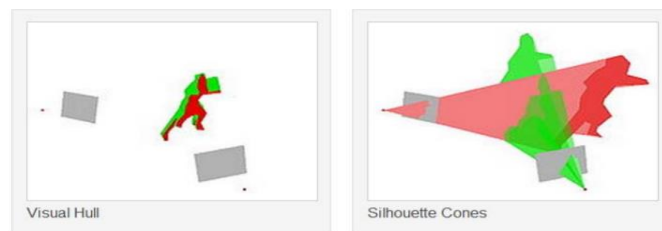
Şekil 2.26. Yersel fotogrametri ile elde edilen fotoğraflar (Demir, 2018).



Şekil 2.27. Yersel fotogrametri ile oluşturulan 3B model (Demir, 2018).

Gölge Tabanlı Tarama Sistemleri: Gölgeleme, yüzey şeklinin insan tarafından algılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. İnsan beyni şekil bilgisini çıkartmada yalnızca gölgelemeyi kullanmamaktadır fakat gölgeleme cisimlerin ana hatları, temel özellikleri ve görsel sistem bilgilerini sağlamaktadır (Karkınlı, 2011). Gölge tabanlı tarama sistemleri cisimlerin yüzeyleri üzerinde gölgelendirme esnasında parlaklıklarında meydana gelen değişimi algılayarak çalışan sistemlerdir. Parlaklık değişimine bağlı olarak cisimlerin yüzeylerinde değişik parlaklığa sahip bölgeler sistem tarafından algılanarak derinlik, mesafe ve şekil bilgisi hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Bilgiler kullanılarak cismin model oluşumu sağlanır (Işık, 2019).

Siluet Tabanlı Tarama Sistemleri: Siluet tabanlı tarama sisteminde tarama yapılacak cismin fotoğrafları değişik bakış yönlerinden çekilir. Pozlardaki siluet sınırı dışında kalan arka plan detayları temizlenir. Temizleme işleminden geri kalan bilgilerle dış yüzey silüetleri oluşturulur. Bu silüetler birleştirilerek cismin modelinin elde edilmesi sağlanır (Işık, 2019). Konilerin kesiştirilmesi (Visual Hull), Voxel Coloring, Space Carving gibi çeşitli siluet tabanlı modelleme yöntemleri bulunmaktadır. Konilerin kesiştirilmesi yönteminde, her görüntüde cismin silüeti görüntüdeki diğer bölümlerden ayrılır ve görüntülerin kesiştirilmesiyle 3D model elde edilir. Cismin geometrik detaylarının elde edilmesi görüntü sayısı ile doğru orantılıdır. Kullanılan görüntü sayısı arttıkça daha fazla detay elde edilir. Yöntemin dezavantajı girinti ya da iç bükey ayrıntıları elde edememesidir. Şekil 2.28’de siluet tabanlı modelleme yöntemlerinden konilerin kesiştirilmesi yöntemi gösterilmiştir.

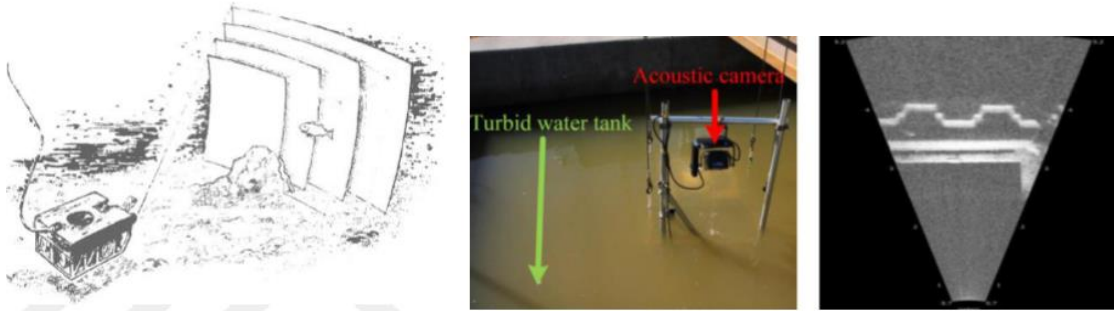


Şekil 2.28. Konilerin kesiştirilmesi yöntemi.

Akustik yöntem

Akustik yöntemde yüzeyden yansıyan ses kullanılır. Akustik yöntemler yüzyıllardır mesafe ölçümünde kullanılmışlardır. Sonar'lar genellikle bu amaçla kullanılmaktadırlar. Aynı şekilde otomatik odaklı kameralar da akustik yöntemleri kullanmaktadır. Bu yöntem, uçuş zamanı yönteminde ışıkla yapıldığı gibi, ses dalgalarının yüzeyden yansımalarını kullanarak, ses kaynağı ve yüzey arasındaki mesafeyi ses hızı bilgisi ile ölçmektedir (Yıldız, 2017). Nesnelerin iç yapısı ve kaba görüntüsü hakkında bilgiler elde edilir.

Özellikle sualtı nesnelere üç boyutlu yeniden yapılandırılması ve analizi için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Ortam şartlarından kaynaklanan kısıtlamalarda da görüntüleme teknolojisi olarak akustik kameralar kullanarak yine nokta bulutu şeklinde ürünün modelini çıkarmayı amaçlamaktadır. Akustik kameralar akıcı sulara bile net detaylarla nesne görüntüsü sağladıkları için, 3B ölçüm sistemlerine de uygulanabilirler (Demir, 2018). Şekil 2.29'da akustik yöntemle veri elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Akustik yöntem ile veri elde edilmesi (Demir, 2018).

Manyetik yöntem

Manyetik yöntemde yüzeye temas eden manyetik alan kullanılır. Manyetik alan hesaplamaları; manyetik alan kaynağının gücünü algılama prensibine dayanır. Alan içerisindeki algılama ucunun yer ve yönünü belirlemek için genellikle manyetik dokunma probu kullanılır. Algılama ucu, ilgili noktaya konumlandığında, kullanıcıya sadece belirli bir nokta verisini kaydedebilmesine izin veren bir tetikleme hareketi gerçekleşir. İç malzeme özelliklerinin ölçüleceği ultra-ses ile benzer uygulamalarda manyetik rezonans kullanılır. MRI (Manyetik rezonans) ölçülecek maddenin atomlarını aktive eder ve ardından tepkilerini ölçer (Yıldız, 2017).

Temaslı ve temassız tarama yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları vardır. Çizelge 2.1’de temaslı tarama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları, Çizelge 2.2’de ise temassız tarama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Temaslı tarama yönteminin avantajları ve dezavantajları (Demir, 2018).

Temaslı Tarama Sistemi	
Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"> • 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 manuel olarak model ürünü tarama yapma imkanı. • Yüzeyde bulunan toz, yağ ve sıvılara rağmen doğru tarama yapılabilmesi. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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.

Çizelge 2.2. Temassız tarama yönteminin avantajları ve dezavantajları (Demir, 2018).

Temassız Tarama Sistemi	
Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"> ● 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 (± 0.001mm 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. ● Ergonomik ve kullanımının kolay olup, model ürünün istenilen yere taşıma ihtiyacı olmadan tarama yapılabilmesi. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Cihaz fiyatlarının çok yüksek olması. ● Yansıtıcı özelliği olan model ürünlerin taranması mümkün değildir (Lazer tarama sistemi hariç). ● 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.

3. MATERYAL VE METOD

Çalışmadaki parçaların yüzey verileri 3 boyutlu tarama cihazlarıyla alınmıştır. KDPÜ İLTEM’de yapılan taramada HDI ADVANCE optik tarama cihazı kullanılmıştır. KERAMİKA firmasında yapılan taramada Scan IN A BOX FX optik tarama cihazı kullanılmıştır. POLMAR firmasında yapılan taramada ise ROMER ABSOLUTE ARM 7252SI lazer tarama cihazı kullanılmıştır. Tersine mühendislik işlemlerinde kullanılan yazılım için KPDÜ İLTEM’in alt yapısı kullanılmıştır.

HDI ADVANCE optik tarama cihazı özellikleri

Kamera: 2.8 megapiksellik çift kamera ile optik (beyaz ışık) tarama

Tarama Yazılımı: FlexScan3D

Tarama Hızı: 0.88 sn.’ de tarama başına 2.6 milyon nokta renkli tarama

Her Bir Taramada Elde Edilebilecek Veri: 2.6 milyon nokta-5.2 milyon poligon

HDI ADVANCE optik tarama cihazının görseli Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. HDI ADVANCE optik tarama cihazı.

ROMER ABSOLUTE ARM 7252SI lazer tarama cihazı özellikleri

Lazer gücü kontrolü: Otomatik

Tarama Hızı: Saniyede 460000 nokta tarama

Her bir çizgi için elde edilen nokta: 4600

Hat hızı: 100 Hz

ROMER ABSOLUTE ARM 7252SI lazer tarama cihazının görseli Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. ROMER ABSOLUTE ARM 7252SI lazer tarama cihazı.

SCAN IN A BOX FX optik tarama cihazı

Kamera: 2 megapiksellik çift kamera ile optik (yapısal ışıklandırma) tarama

Tarama Yazılımı: IDEA Yazılımı FX sürümü

Taranacak Objeler Ölçüleri: 10 mm ile 300 mm arasındadır

SCAN IN A BOX FX optik tarama cihazının görseli Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. SCAN IN A BOX FX optik tarama cihazı.

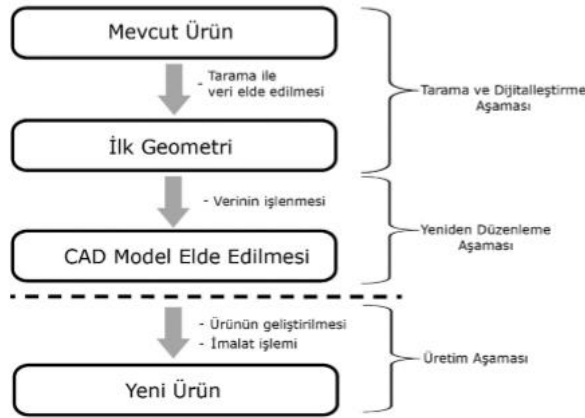
Bu çalışmada tersine mühendislik işlemleri için SolidWorks programı kullanılmıştır. 3 boyutlu tarama cihazıyla tarama parçasından veriler elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler

programın Scan to 3D eklentisi ile açılmıştır. Scan to 3D eklentisinin alt modülleri olan Mesh Hazırlık Sihirbazı, Mesh Düzenleme, Yüzey Sihirbazı, Eğri Sihirbazı, Sapma Analizi modülleri kullanılarak veriler işlenmiş ve parçanın nokta bulutundan ya da mesh yapısından katı modeli elde edilmiştir.

3.1. Tersine Mühendislik İşlem Basamakları

Tersine mühendislik bir nesnenin kopyasını ya da fonksiyonel olarak yeniden konstrüksiyonunu yapmak için bir ölçme, analiz ve test süreci olarak tanımlanabilir (Önçağ vd., 2017). Bu yaklaşım bir ürünün yüzey verilerinin elde edilmesini, bu veriler ile CAD modelinin oluşturulmasını ve sonrasında imalatını kapsayan bir süreçtir (Şekil 3.4). Tersine mühendislik işlemi temel olarak 4 adımda incelenebilir (Sarı, 2019).

- Tarama veya dijitalleştirme
- Tarama verisinin işlenmesi
- İşlenen veriden yüzey oluşturulması
- Hızlı prototipleme ile imalat

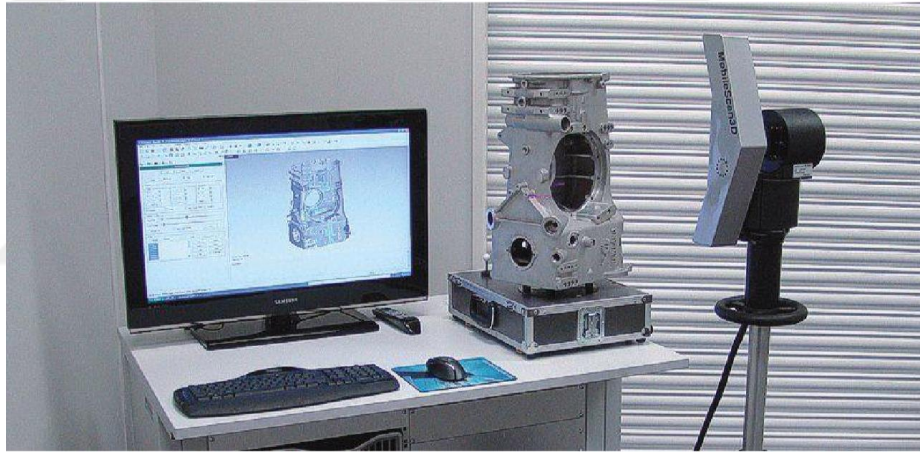


Şekil 3.4. Tersine mühendislik işlemi şeması (Sarı, 2019).

3.1.1. Tarama veya dijitalleşme

Tersine Mühendislik işleminin ilk basamağı tarama veya diğer adıyla dijitalleştirme'dir. Modelin düzgün taranması modelden elde edilecek bilgilerin doğruluğunu direkt etkilediğinden son derece önemlidir. Model yüzeyi, tarama esnasında düzgün görüntü almanızı zorlaştırabilir bu durumda model yüzeyi tarama işlemine başlanmadan önce uygun sprey boya ile boyanır. Model yüzeyi optik ya da lazer tarayıcılar yardımıyla taranır. Optik tarama cihazlarıyla girinti çıkıntısı

az olan, küçük delik çapları içermeyen, yüzeyi üzerinde daha az detay bulunan parçalar; lazer tarama cihazlarıyla girinti çıkıntısı fazla olan, çok sayıda küçük çaplı delik içeren, yüzeyi daha detaylı parçalar taranırsa tarama kaynaklı sapma miktarı minimumda tutulmuş olur. Model yüzeyinden alınan veriler nokta topluluğu şeklindedir bu nokta topluluğuna nokta bulutu denir. Alınan veriler üzerinde; elde edilen birçok görüntüden tek görüntü elde edilmesi, istenmeyen verilerin silinmesi, koordinat sistemine yerleştirilmesi gibi düzenlemeler yapılır. Elde edilen veriler nokta bulutu olarak CAD programında kullanılacaksa gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra '.xyz, .txt, .asc, .vda, .igs,.ibl' gibi formatlarda kaydedilir. CAD programına nokta bulutu değil de meshli bir yapı kullanılmak istenirse aynı şekilde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra veriler '.3ds, .obj, .stl, .wrl, .ply,' gibi formatlarda kaydedilir. Şekil 3.5'de tarama işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Tarama işlemi.

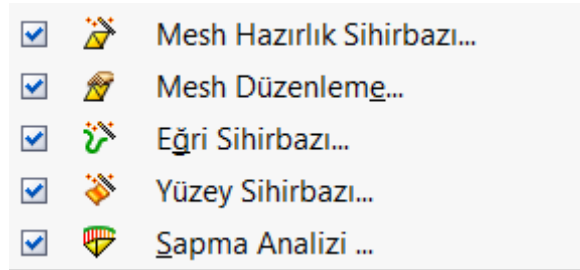
3.1.2. Tarama Verisinin İşlenmesi

Tarama verisi CAD programlarında nokta bulutu ya da mesh yapı olarak açılır. Programda yapılacak işlemlerde yavaşlamaya neden olacak büyüklükte bir veri varsa gerekli model verilerine zarar vermeyecek şekilde nokta bulutu boyutu ya da mesh boyutu küçültülür. Nokta bulutunun etrafında tarama kaynaklı ya da tarama ortamından kaynaklı oluşan gereksiz veriler silinir, daha sonra yapılacak yüzey oluşturma işlemlerinde fayda sağlayacağı düşünüüyorsa noktalar arası mesafe artırılıp azaltılabilir. Nokta bulutunda bu düzenleme işlemleri yapıldıktan sonra mesh yapı oluşturulur. Nokta bulutunda gerekli görülen düzenlemeler (yukarıda anlatılan) yapılarak meshli yapı oluşturulduysa mesh üzerinde tekrar düzenleme yapılmasına gerek duyulmaz. Eğer CAD programına tarama verileri mesh yapı olarak alındıysa

(.stl vb. formatında) mesh üzerinde düzenlemeler yapılır. İstenen ana mesh yapı etrafında tarama kaynaklı ya da tarama ortamı kaynaklı gereksiz veriler silinir. Mesh yapının yüzeyi pürüzsüzleştirilir. Eğer tarama kaynaklı eksik veriden dolayı sınırlar düz bir doğru şeklinde elde edilemeyecekse (yüzey oluşturma işlemlerinde model sınırlarının doğru belirlenebilmesi taranan model ile tersine mühendislik işlemleri sonucu ortaya çıkarılan CAD model arasındaki sapma değerini azaltır) mesh pürüzsüzleştirme modülü içinde alt modül olarak bulunan sınır pürüzsüzleştirme işlemi yaptırılır. Mesh üzerinde eksik taramadan kaynaklı delik ya da çatlaklar olarak elde edilen ancak taranan modelde dolu olan ve daha sonra yapılacak yüzey oluşturma işlemleriyle oluşturulamayacak delik ya da çatlaklar doldurulur. Tersine mühendislik modülleri içerisindeki eğri oluşturma modülüyle mesh yapının sınırları belirlenir. (Mesh üzerinde farklı yüzeylerde düzlemler oluşturulur kesit alınmak istenilen yüzeylerdeki düzlemler yardımıyla mesh'ten kesitler alınır.)

3.1.3. İşlenen Veriden Yüzey Oluşturulması

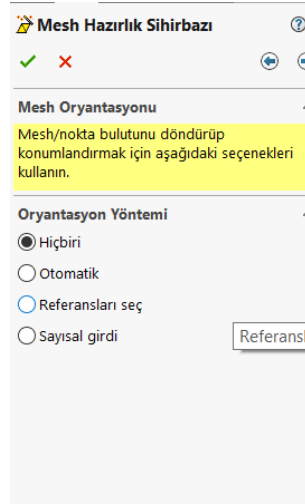
İşlenen veriden yüzey oluşturmak için SolidWorks programındaki Scan to 3D eklentisi kullanılır. Scan to 3D eklentisi; Mesh Hazırlık Sihirbazı, Mesh Düzenleme, Eğri Sihirbazı, Yüzey Sihirbazı ve Sapma Analizi olmak üzere 5 modül içerir. Şekil 3.6'da Scan to 3D modülleri görülmektedir.



Şekil 3.6. Scan to 3D modülleri.

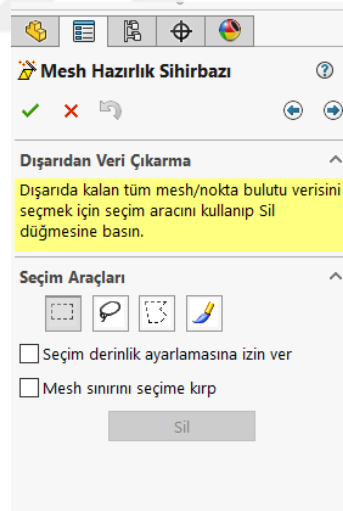
Scan to 3D modüllerinden Mesh Hazırlık Sihirbazı üç boyutlu tarama cihazıyla taranıp programda açılan mesh yapıyı düzenlemek için çeşitli seçenekler sunar. Mesh Hazırlık Sihirbazında bulunan düzenleme seçenekleri sırasıyla; Mesh Oryantasyonu, Dışarıdan Veri Çıkarma, Basitleştirme, Düzleştirme ve Boşluk Doldurmadır.

Mesh oryantasyonu: Mesh yapının konumunun istenilen şekilde değiştirilmesine yardımcı olur (x, y ya da z yönünde hareket ettirme veya döndürme). Şekil 3.7'de mesh yapının konumunun düzenleme işleminin yapıldığı mesh oryantasyonu modülü görülmektedir.



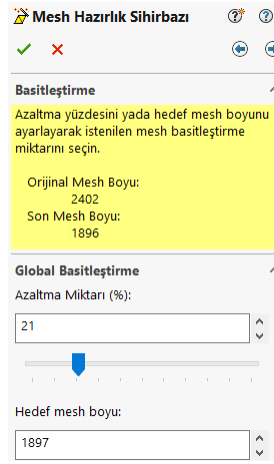
Şekil 3.7. Mesh oryantasyonu.

Dışarıdan veri çıkarma: Tarama kaynaklı mesh etrafında oluşan mesh dışındaki gereksiz verilerin silinmesidir. Şekil 3.8’de gereksiz verilerin silinmesi işleminin yapıldığı dışarıdan veri çıkarma modülü görülmektedir.



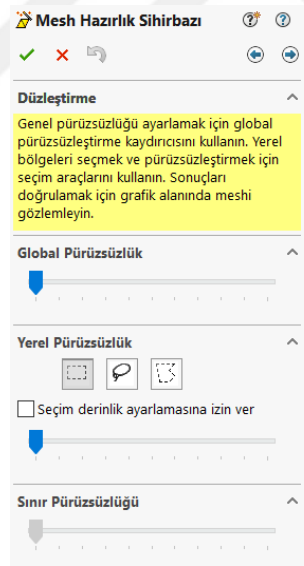
Şekil 3.8. Dışarıdan veri çıkarma.

Basitleştirme: Mesh boyutunun azaltılmasını sağlayan modüldür. İlk mesh boyutu yüzde olarak azaltılabilir ya da istenilen son mesh boyutu elle girilebilir. Şekil 3.9’da Basitleştirme ile ilgili görüntü verilmiştir.



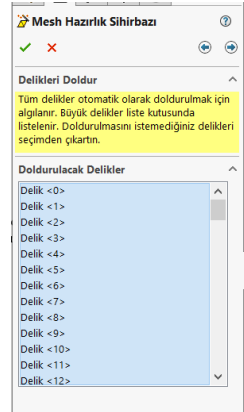
Şekil 3.9. Basitleştirme işlemi.

Düzleştirme: Mesh yüzeyi pürüzsüzleştirmek istendiğinde kullanılır. Pürüzsüzlük değeri modülde bulunan kaydırma çubuğu ile ayarlanır. Şekil 3.10'da pürüzsüzlük işleminin yapıldığı ekranın görüntüsü verilmiştir.



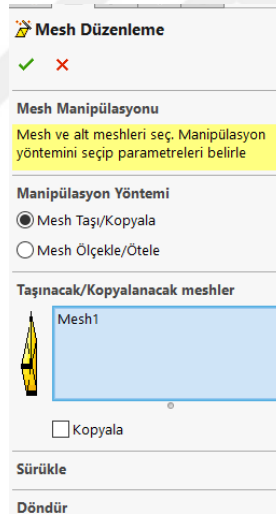
Şekil 3.10. Düzleştirme işlemi.

Boşluk doldurma: Mesh üzerinde delik ya da çatlakları doldurmak için kullanılır. Delik ya da çatlakları program kendi belirler, doldurulması istenmeyen boşluk ya da delikler seçilerek silinir. Şekil 3.11'de boşluk doldurma işleminin ekran görüntüsü verilmiştir.



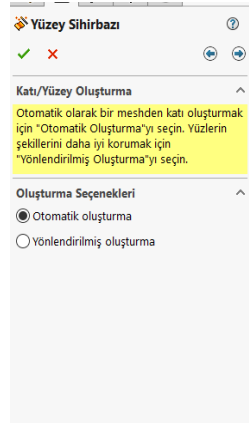
Şekil 3.11. Boşluk doldurma işlemi.

Scan to 3D eklentisindeki Mesh Düzenleme Modülü, mesh yapının istenilen doğrultuda taşınıp istenilen konumda kopyalanması için kullanılır. Şekil 3.12’de Mesh Düzenleme modülü ile ilgili görüntü verilmiştir.



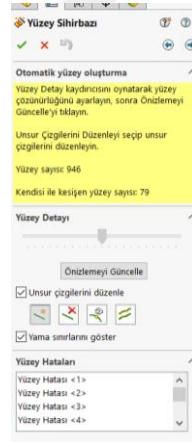
Şekil 3.12. Mesh düzenleme modülü.

Scan to 3D eklentisindeki Yüzey Sihirbazı Modülü yüzey oluşturmak için iki farklı yüzey oluşturma seçeneği sunar. Bunlardan biri Otomatik Oluşturma seçeneği diğeri Yönlendirilmiş Oluşturma seçeneğidir. Şekil 3.13’de Yüzey Sihirbazı modülü ile ilgili görüntü verilmiştir.



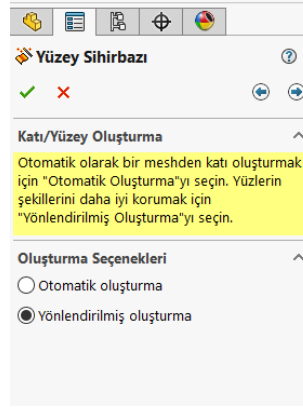
Şekil 3.13. Yüzey sihirbazı modülü.

Yüzey Sihirbazı modülünde Otomatik Oluşturma seçeneğinde mesh yapı program tarafından otomatik olarak yüzeye dönüştürülür. Ancak program tarafından oluşturulan bu yüzey üzerinde herhangi bir düzenleme işlemi (katı modelin köşelerine pah kırma, istenilen bir bölgede delik delme vb.) yapılamaz. Şekil 3.14’de Otomatik Oluşturma komutuyla ilgili görüntü verilmiştir.



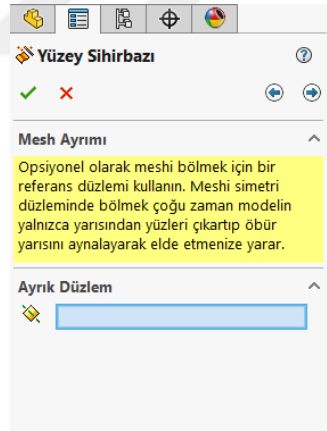
Şekil 3.14. Otomatik yüzey oluşturma.

Yüzey Sihirbazı modülünde Yönlendirilmiş Oluşturma komutunda, kullanıcı yüzey şekillerini düzenler ve programın verdiği geometrik yapılarla manuel olarak mesh yüzeyini kaplar. Yönlendirilmiş Oluşturma komutunda sırasıyla; Mesh Ayrımı, Yüz Tanıma ve Yüzey Çıkarılması işlemleri yapılır. Şekil 3.15’te Yönlendirilmiş Oluşturma komutuyla ilgili görüntü verilmiştir.



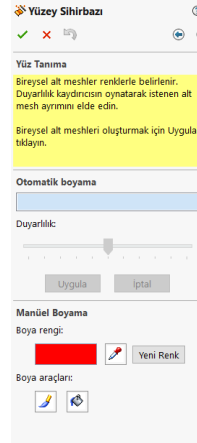
Şekil 3.15. Yönlendirilmiş yüzey oluşturma.

Mesh Ayrımı: Mesh Yapı simetrik olduğunda meshi simetri düzleminden bölmek için kullanılır. Meshin yarısındaki yüzler çıkarılır aynalama komutlarıyla meshin kalan yüzeyi kolayca oluşturulur. Şekil 3.16'da Mesh Ayrımı modülüyle ilgili görüntü verilmiştir.



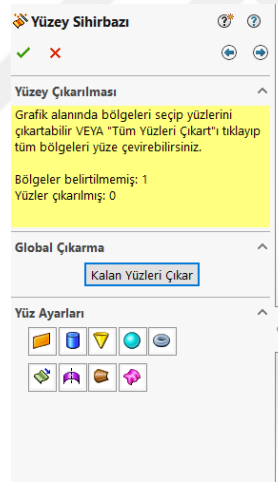
Şekil 3.16. Mesh ayrımı işlemi.

Yüz Tanıma: Meshi alt meshlere ayırmak için kullanılır. Otomatik ya da manuel olarak alt meshler oluşturulur. Alt meshlerin doğru olarak belirlenmesi yüzey giydirme işlemlerinde son derece önemlidir. Şekil 3.17'de Yüz Tanıma modülüyle ilgili görüntü verilmiştir.



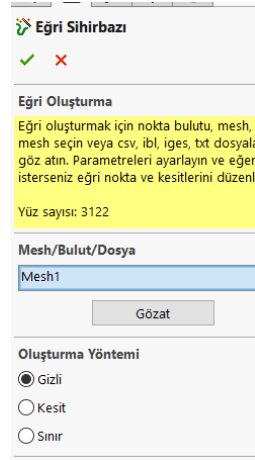
Şekil 3.17. Yüz tanıma işlemi.

Yüzey Çıkarılması: Bir önceki aşamada belirlenen alt meshlere göre otomatik olarak yüzey oluşturmak ya da bu modülde bulunan geometrik yapılarla manuel olarak yüzey oluşturmak için kullanılır. Şekil 3.18’de Yüzey Çıkarma modülüyle ilgili görüntü verilmiştir.



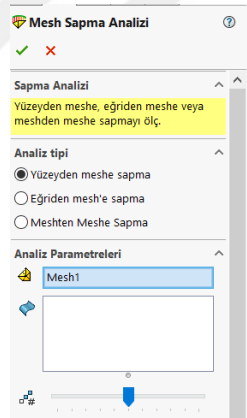
Şekil 3.18. Yüzey çıkarma işlemi.

Scan to 3D eklentisindeki Eğri Sihirbazı modülü mesh yapının sınırlarını belirlerken ve istenilen açıdan meshten kesitler alınırken kullanılır. 2D, 3D olarak elde edilen sınır çizgileri ve kesitlerden alınan çizgiler kullanılarak yüzey komutlarıyla ya da katı komutlarıyla katı model oluşturulur. Şekil 3.19’da Eğri Sihirbazı ile ilgili görüntü verilmiştir.



Şekil 3.19. Eğri sihirbazı modülü.

Scan to 3D eklentisindeki Sapma Analizi modülü üç boyutlu tarama ile elde edilen veri ile bu veriler yardımıyla oluşturulan katı modelin arasındaki sapmayı belirlemek için kullanılır. Şekil 3.20’de Sapma Analizi ile ilgili görüntü verilmiştir.



Şekil 3.20. Sapma analizi modülü.

Kalibrasyon: Belirlenmiş koşullar altında, doğruluğu bilinen bir ölçüm standardını veya sistemini kullanarak diğer test ve ölçüm aletinin doğruluğunun ölçülmesi, sapmalarının belirlenmesi ve doküman haline getirilmesi için kullanılan ölçümler dizisidir (biyokam.gazi.edu.tr). 3D tarama cihazlarının kalibrasyonu tarama sonuçlarını değiştirebileceğinden son derece önemlidir. Tarama cihazının teknik özelliklerini (kameraların tam kapasiteyle kullanılabilmesi vb.) tam kapasiteyle kullanabilmek için kamera açısının ve kullanılan ışığın (beyaz ışık, lazer vb.) parçaya göre doğru konumlandırılması gereklidir. Tarama cihazlarının kalibrasyonu için en yaygın bilinen yöntem tarama cihazıyla birlikte verilen tarama

programını ve kalibrasyon tahtasını kullanarak tarama cihazını kalibre etmektir. Bu kalibrasyon yönteminde kalibrasyon tahtası düz bir zemine yerleştirilir, tarama cihazıyla birlikte alınan programda kalibrasyon için oluşturulmuş kalibrasyon modülü açılır, tarama cihazı kalibrasyon tahtasını görecektir şekilde yerleştirilir, programda belirtilen alan ile tarayıcınızın kalibrasyon tahtasında gördüğü alan aynı olacak şekilde tarama cihazınızı hizalayın, tarayıcı doğru konuma geldiğinde kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Mesh yapıdan yüzey ya da katı model oluşturmanın birden fazla yolu vardır. Bu yollardan biri programın kullanıcıya sunduğu basit geometrik yapıları kullanarak parça yüzeylerini oluşturmaktır. Mesh yapıda gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (bir üstte tarama verisinin işlenmesinde anlatılan düzenlemeler) programın size sunduğu silindir, koni, bspline gibi hazır geometrik yapılarla mesh yapının yüzeyi kaplanır. Kullandığınız programda yüzey düzenleme ile ilgili modüller yardımıyla yüzeylerdeki fazla kısımları kırma, eksik kısımları uzatma gibi işlemler yapılarak modelin yüzeyleri elde edilir. Bir diğer yolda mesh yapıdan elde edilen kesitlerden yararlanılır. Mesh üzerinde gerekli düzenlemeler yapılır (bir üstte tarama verisinin işlenmesinde anlatılan düzenlemeler). Meshin farklı yüzlerinde düzlemler oluşturulur, bu düzlemlerle parçanın farklı yüzlerinden kesitler alınır. Programda bulunan çizim modülleriyle, önceden oluşturulan kesit çizgilerinden yararlanılarak meshin geometrisi oluşturulur. Oluşturulan çizim katı düzenleme modülleriyle katı yapıya dönüştürülür. Mümkünse çizgi düzenleme işlemleri yapılmadan kesit çizgilerinden katı düzenleme modülleriyle de katı yapı oluşturulur.

3.1.4. Hızlı prototipleme ile imalat

Hızlı prototipleme ile imalatta 3 boyutlu yazıcılar kullanılır. Çok boyutlu yazdırma, dijital ortamda hazırlanmış olan üç boyutlu verilerden üç boyutlu katı obje imalatı sürecidir. Bu aşamayı gerçekleştiren makineler çok boyutlu yazıcılar olarak adlandırılır. Bu makineler aracılığı ile üç boyutlu tasarımı gerçekleştirilen veriler, çok kısa bir süre içerisinde elle tutulur şekilde incelenmeye olanak sağlayan katı nesnelere haline gelebilmektedir. Yazdırılacak model, amaca hizmet eden çeşitli programlar kullanılarak bilgisayar ortamında dilimleme adı verilen işlemde geçer ve istenen hassasiyetlerde katmanlara ayrılır. Bu katmanlar üç boyutlu yazıcının kullandığı teknolojiye göre farklı işlemde geçen materyal üst üste yığılma halinde yazdırılarak somut nesnelere haline dönüşür (Çiftçi vd.,2019).

Tersine mühendislik ile ürünün yeniden oluşturulması ya da onarılmasının mümkün olduğu yerlerde sıfırdan yapılan tasarıma göre; ürün daha hızlı oluşturulacağından zamandan tasarruf edilmiş, taranan parçanın eksiklikleri bilindiği ve bu eksiklikler üzerinde çalışıldığından parçadan alınan verim artmış ve ürün üretimi zahmetsiz bir şekilde yapılmış olur.

Tersine mühendislik için özel hazırlanan tersine mühendislik yazılımları mevcuttur. Özel yazılımların yanı sıra halihazırda sanayide yaygın kullanımı olan CAD yazılımlarının içerisinde tersine mühendislik işlemlerini yapmamızı sağlayan CAD programları da vardır. Özel yazılımlar tersine mühendislik işlemlerine yönelik hazırlandığından hızlıca istenen modelin verilerini elde etmemizi sağlar ancak bu programların firmalar için bir maliyeti vardır. Endüstride tasarım için yaygın olarak kullanılan CAD programlarından bazıları da yukarıda belirtildiği gibi tersine mühendislik işlemlerinin yapılmasını sağlar. Bu CAD programları yardımıyla çok karmaşık olmayan modellerin tersine mühendislik ile CAD verilerini elde etmek mümkündür. Hali hazırda kullanılan bu CAD programı tersine mühendislik işlemleri için de kullanıldığında, tasarımcı aşına olduğu ara yüz ile hem tasarım hem de tersine mühendislik işlemlerini daha hızlı bir şekilde gerçekleştirmiş olur. Firmanın, tasarımda kullanıldığı program dışında ikinci bir program maliyeti ve yeni programı personelin öğrenme maliyeti ortadan kalkmış olur.

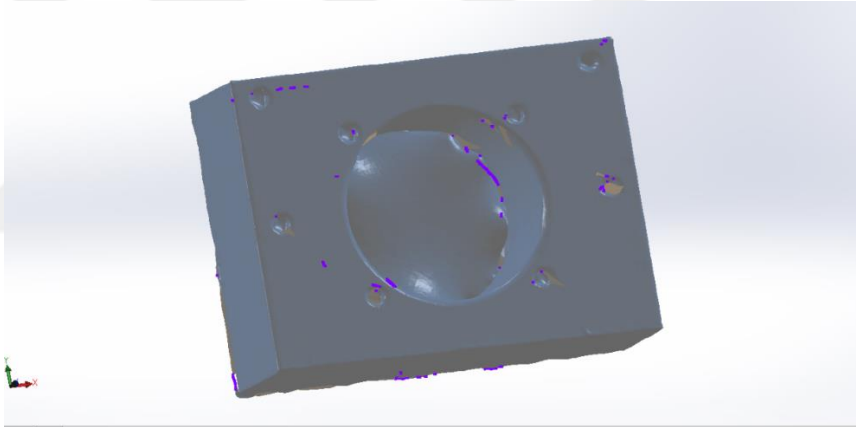
SolidWorks programı makine sanayiinde yaygın olarak kullanılan bir CAD programıdır. Bu program, tersine mühendislik işlemlerini yapmayı mümkün kılmaktadır. Sanayide yaygın kullanıldığından birçok firmada program mevcuttur ve tasarımcılar programın ara yüzüne hakimdir. Bu nedenle tasarımcı bu programı tersine mühendislik işlemleri için rahatça kullanabilir. Bu çalışmada sanayiden alınan modellerin optik ya da lazer tarama ile dataları alınmıştır. Yukarıda belirttiğim avantajlarından dolayı SolidWorks programıyla CAD dataları elde edilmiştir.

3.2. Örnek Çalışma 1

İlk uygulamada Keramika Firmasından alınan ve seramik tabakların üretiminde kullanılan bir makinenin parçası ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle parça optik tarama cihazı ile taramış ve dijital verisi elde edilmiştir (Şekil 3.21, Şekil 3.22).

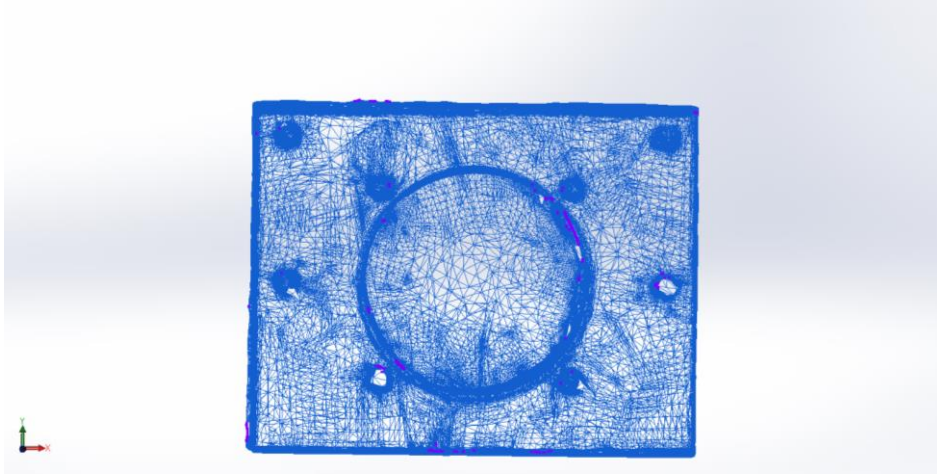


Şekil 3.21. Modelin optik tarama cihazıyla taranması.



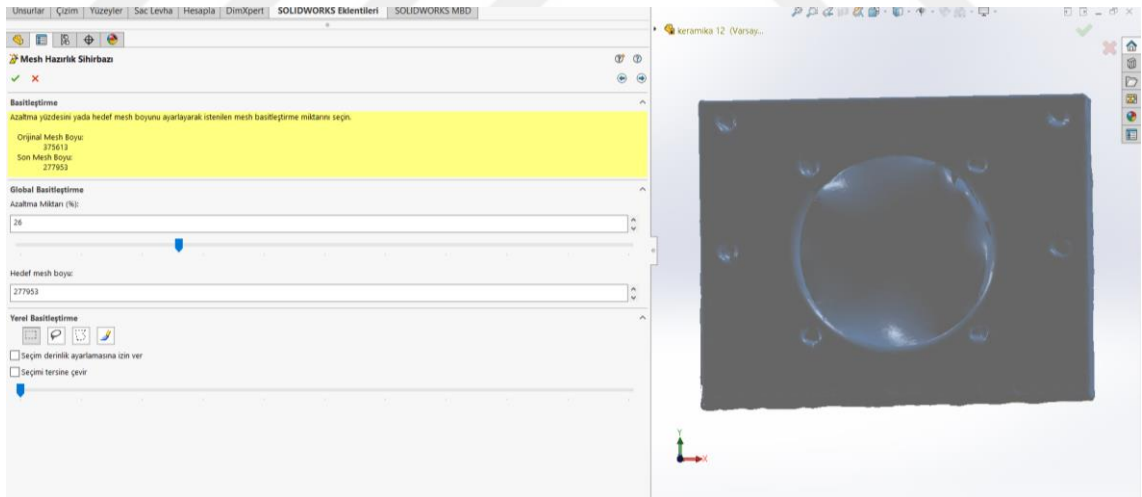
Şekil 3.22. 3 Boyutlu tarama ile elde edilen '.stl' veri.

Optik tarama cihazıyla elde edilen mesh yapı '.stl' formatında Solidworks programına Scan to 3D modülü yardımıyla aktarılmıştır (Şekil 3.23).



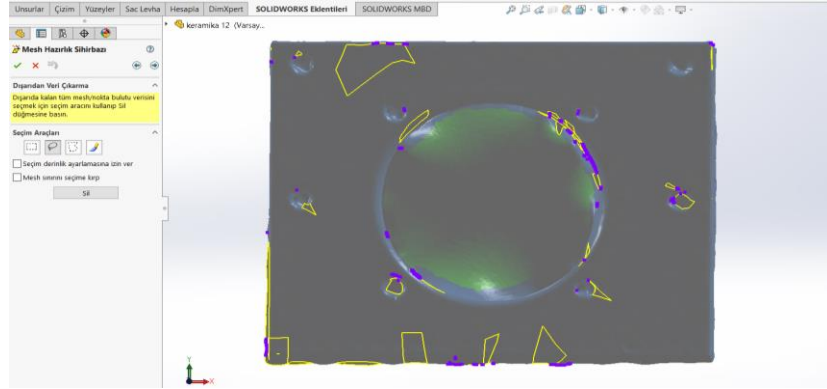
Şekil 3.23. 3 Boyutlu tarama ile elde edilen mesh yapısı.

Scan to 3D modülünde bulunan mesh düzenleme komutlarıyla mesh boyutu düzenlenmiştir (Şekil 3.24). Bu düzenleme, program içerisinde ileride yapılacak işlemler için (yüzey kaplama sırasında mesh boyutunun büyüklüğü nedeniyle program kitenmesi yaşanabilmektedir) kolaylık sağlamıştır.



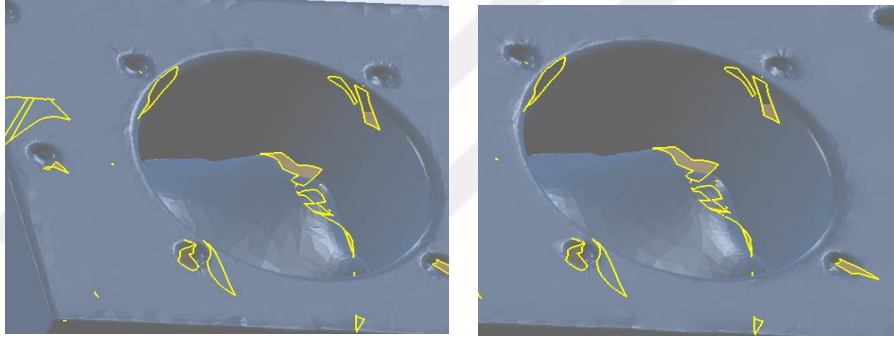
Şekil 3.24. Modelin mesh boyutunun azaltılması.

Model etrafında ya da üzerinde tarama kaynaklı istenmeyen veriler temizlenmiştir (Şekil 3.25).



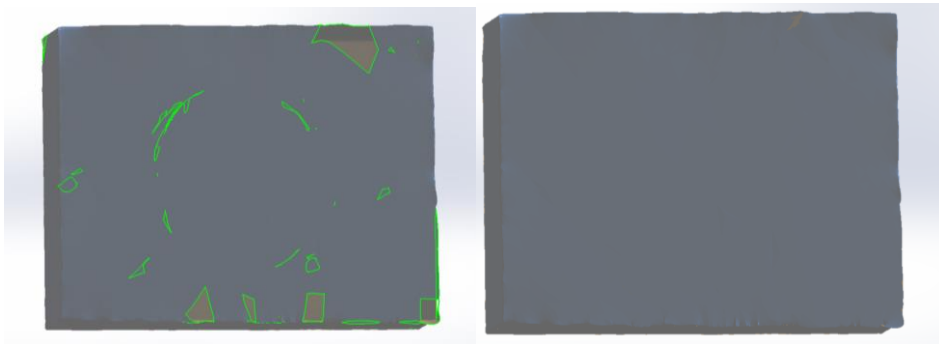
Şekil 3.25. Model etrafında ya da üzerinde istenmeyen verilerin silinmesi.

Modelde pürüzlü yüzler mesh düzenleme aşamasında pürüzsüzleştirilmiştir (Şekil 3.26).



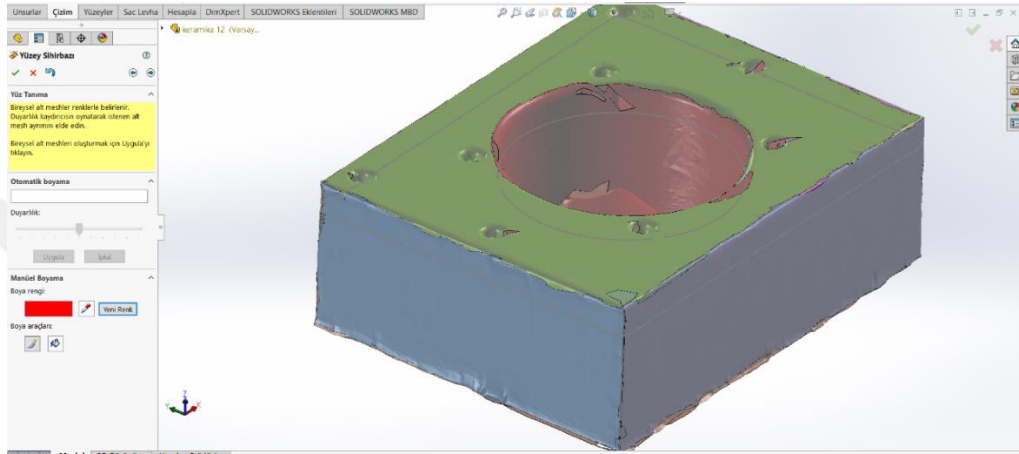
Şekil 3.26. Model yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi.

Daha sonraki adımlarda işlem kolaylığı sağlayabilecek (kesitler yardımıyla oluşturulan çizgilerin kesintiye uğramaması için) model üzerinde boşluklar doldurulmuştur (Şekil 3.27).



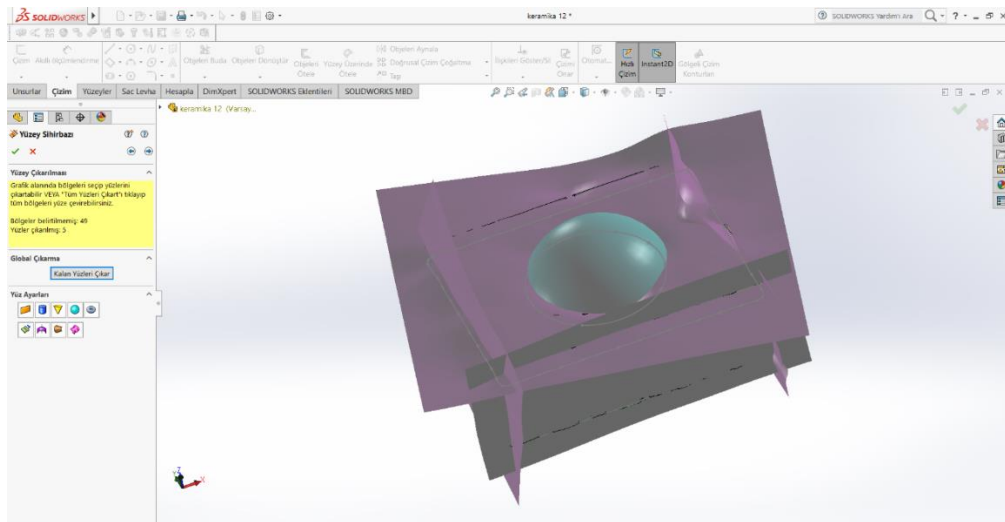
Şekil 3.27. Model üzerindeki boşlukların doldurulması.

Bu işlemlerden sonra iki farklı yol izlenebilir. Birinci yol belirgin geometrik yapısı olan cisimler için kullanıldığında daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu yol takip edilip yüzey düzenleme işlemlerine geçilmiştir. Yüzey düzenleme işlemlerinde başlangıçta program modeli tek bölge olarak kabul eder, modelin yüzeyinin oluşturulacağı bir sonraki adımda uygun geometrik şekillerle kaplamada zorluk yaşamamak için model alt bölgelere ayrılmıştır (Şekil 3.28).



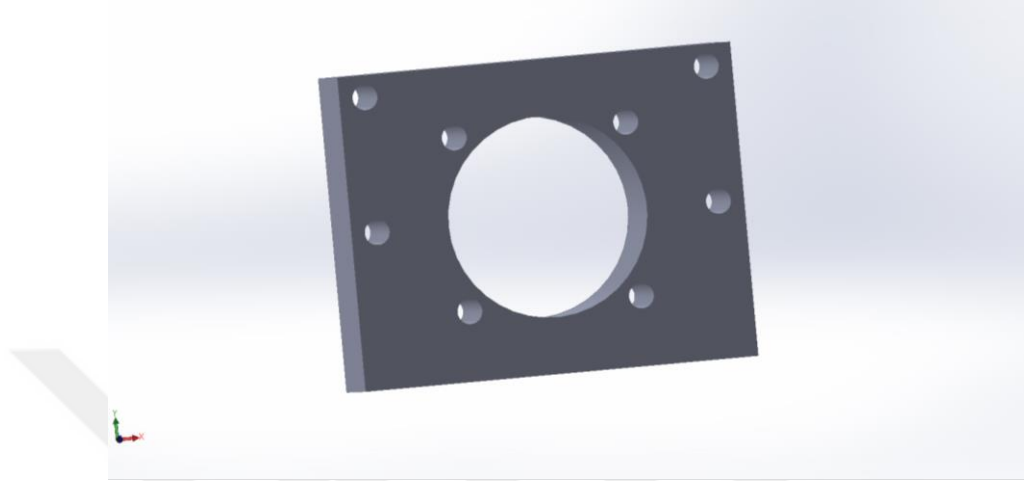
Şekil 3.28. Modeli alt bölümlere ayırma.

Modelin yüzeyini oluşturmak için düzlem, silindir, küre, bspline gibi programın hazır olarak sunduğu geometriler kullanılmıştır (Şekil 3.29).



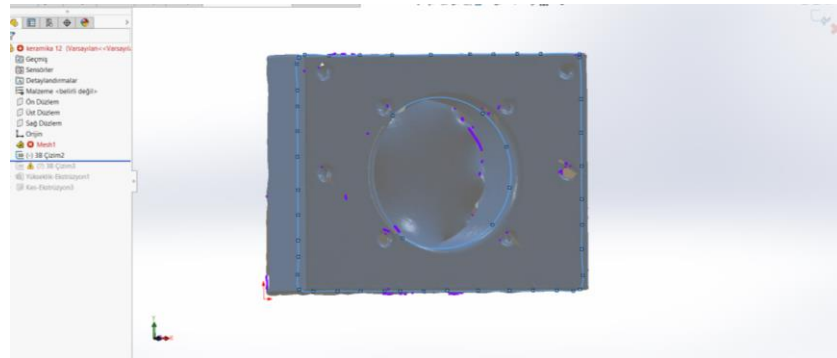
Şekil 3.29. Meshi uygun geometrik şekillerle kaplayarak yüzey oluşturma.

SolidWorks'te bulunan yüzeyler modülünde gerekli düzenlemeler yapılarak meshli yapı katı modele dönüştürülmüş, CAD dataları elde edilmiştir (Şekil 3.30).



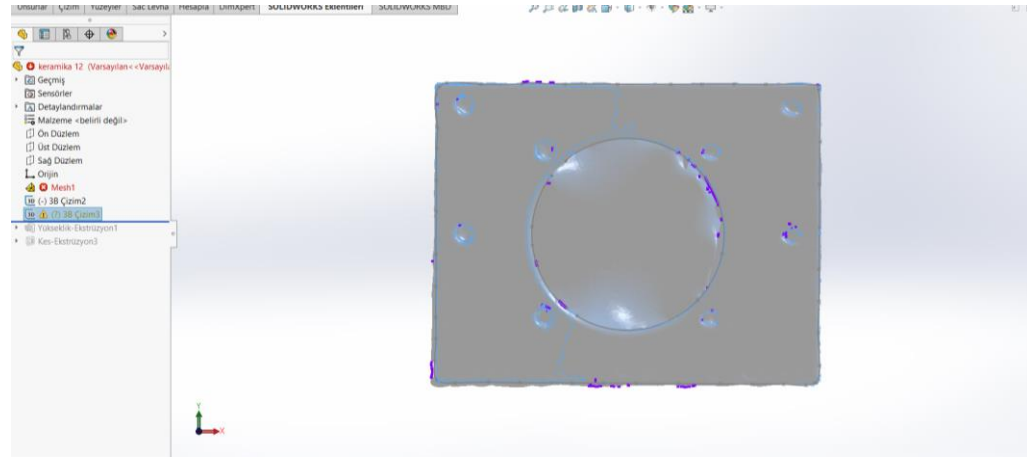
Şekil 3.30. Çalışma sonucunda oluşturulan katı modele.

Belirgin geometrik yapısı olmayan cisimler için ikinci yöntem daha iyi sonuçlar elde etmeyi sağlamıştır. Ayrıca diğer yönteme göre modelin CAD datası daha hızlı elde edilmiştir. Bu yöntemde de ‘.stl’ formatındaki parça SolidWorks’e aktarılmıştır. Mesh düzenleme işlemleri yapılmıştır. Scan to 3D modülleri yardımıyla modelin sınır geometrisi belirlenmiştir (Şekil 3.31).



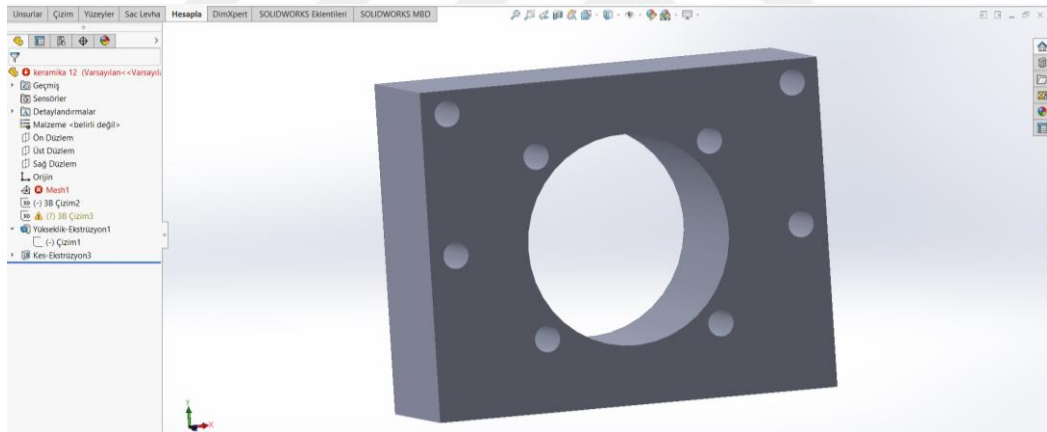
Şekil 3.31. Meshin sınır geometrisinin belirlenmesi.

Modelden kesitler alınabilmesi için modelin yüzeyinde düzlemler oluşturulmuş, Scan to 3D modüllerinden eğri oluşturma yardımıyla daha önce belirlenen düzlemler kullanılarak kesitler alınmıştır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Modelden elde edilen kesitler.

Programda bulunan çizim ve unsurlar modülleriyle gerekli düzenlemeler yapılmış, mesh yapı katı modele dönüştürülmüştür, CAD verileri elde edilmiştir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Çalışma sonucunda oluşturulan katı model.

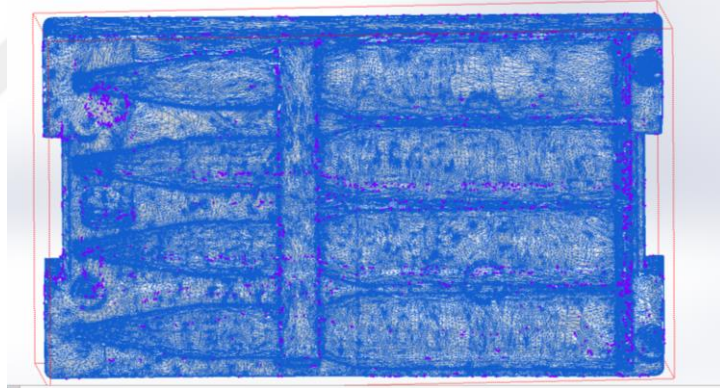
3.3. Örnek Çalışma 2

İkinci uygulamada Polmar Firmasından alınan örnek model kullanılmıştır. Model Polmar Firmasında lazer tarayıcı ile taranmıştır (Şekil 3.34). Lazer taramada optik taramaya göre modeldeki detaylı yapıların gerçek boyutlarına daha yakın ölçüde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum mesh yapıdan katı modele geçişte avantaj sağlamıştır ancak lazerli taramada optik taramaya göre modelden daha fazla veri elde edildiği için mesh boyutu 3-4 kat artmıştır.



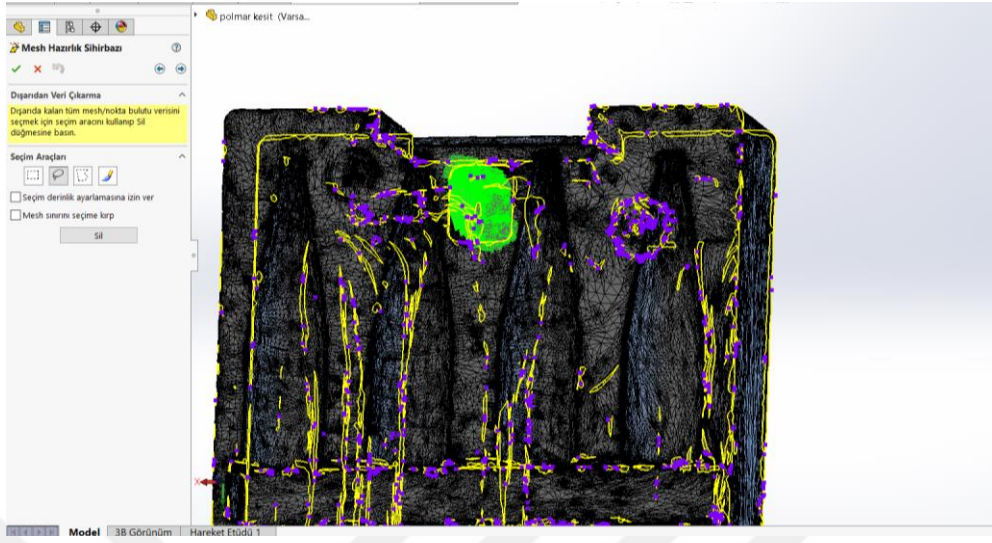
Şekil 3.34. Modelin lazer tarama cihazı ile taranması.

Modelden elde edilen nokta bulutu '.stl' formatına dönüştürülmüştür. '.stl' formatındaki model verileri SolidWorks programına Scan to 3D modülü yardımıyla aktarılmıştır (Şekil 3.35).



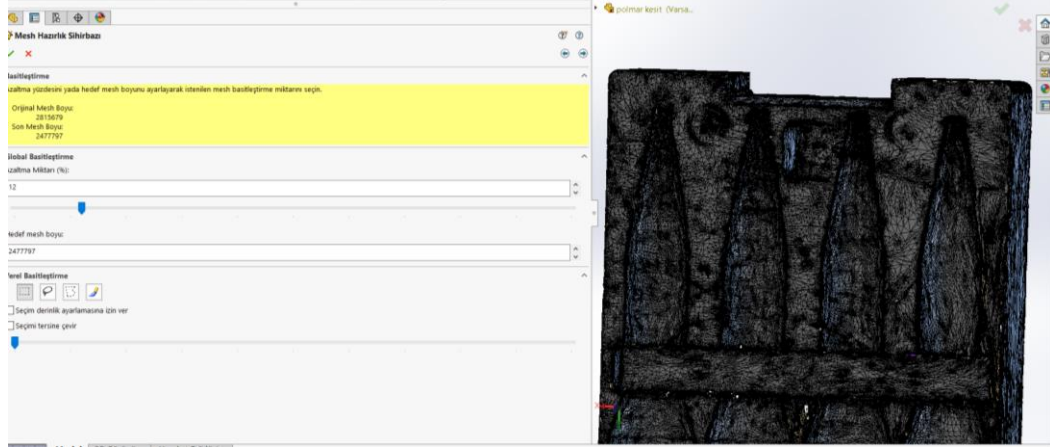
Şekil 3.35. Mesh yapının '.stl' formatında programa aktarılması.

Scan to 3D modülündeki mesh düzenleme işlemine geçilmiştir. Taramadan kaynaklı model çevresinde oluşan ya da model üzerinde olan gereksiz veriler temizlenmiştir (Şekil 3.36).



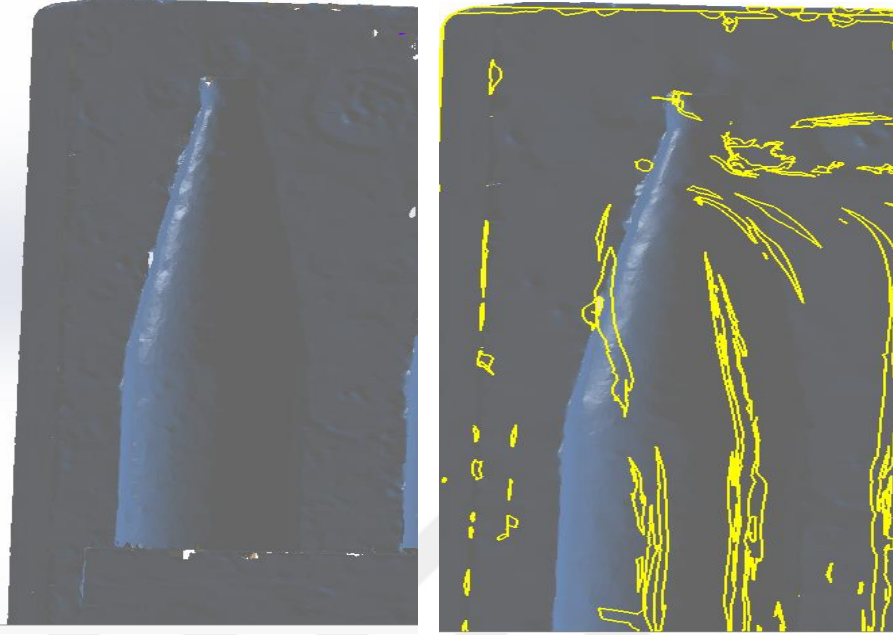
Şekil 3.36. Model çevresinde oluşan gereksiz verilerin temizlenmesi.

İşlem yapımını kolaylaştırmak ve hızlandırmak için mesh boyutu küçültülmüştür (Şekil 3.37).



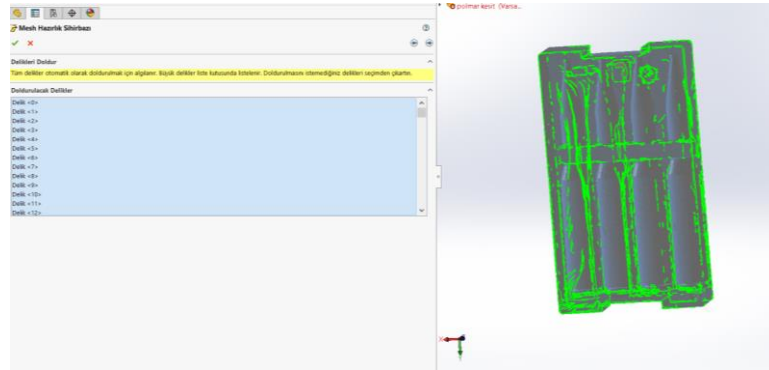
Şekil 3.37. Modelin mesh boyutunun azaltılması.

Modelden daha iyi kesitler alabilmek için yüzeylere pürüzsüzleştirme işlemi yapılmıştır (Şekil 3.38).



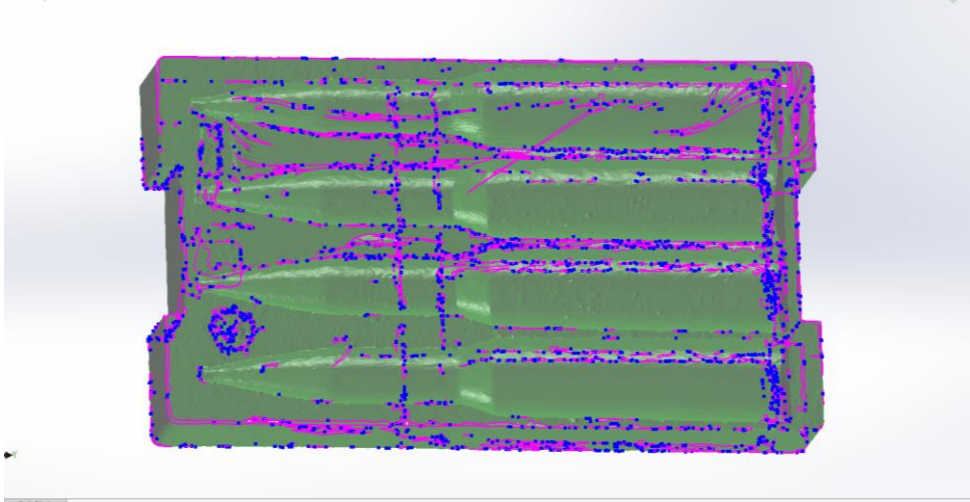
Şekil 3.38. Model formunun pürüzsüzleştirilmesi.

Model üzerindeki gerekli görülen boşluklar işlem kolaylığı sağlamak için doldurulmuştur (Şekil 3.39).



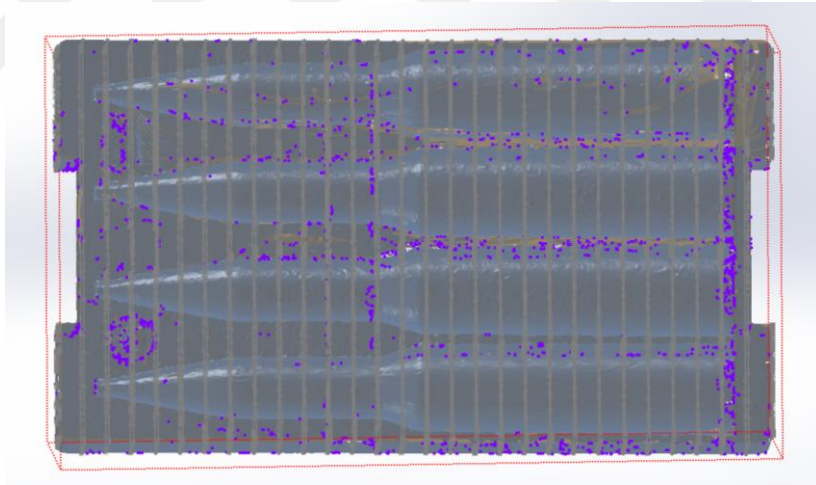
Şekil 3.39. Modelde gerekli görülen boşlukların doldurulması.

Modelin sınırları Scan to 3D içerisinde bulunan modüller yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 3.40).



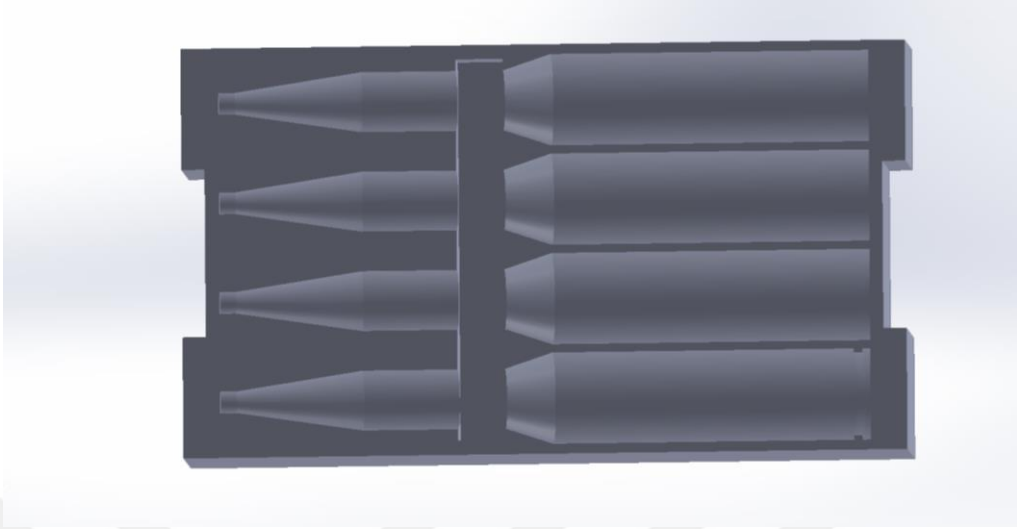
Şekil 3.40. Modelin sınırının çıkartılması.

Modelden uygun kesitler almak için düzlemler oluşturulmuş, Scan to 3D yardımıyla gerekli görülen açılardan kesitler alınmıştır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Modelden elde edilen kesitler.

Programda bulunan çizim ve unsur modülleriyle gerekli düzenlemeler yapılmış, katı model oluşturulmuş, modelin CAD dataları elde edilmiştir (Şekil 3.42).



Şekil 3.42. Çalışma sonucunda oluşturulan katı model.

3.4. Örnek Çalışma 3

Üçüncü uygulamada Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi'nden alınan örnek model kullanılmıştır. Model İleri Teknolojiler Merkezi'nde optik tarama cihazıyla taranmıştır (Şekil 3.43). Optik taramada lazer taramaya göre daha az nokta sayısına sahip bir yüzey elde edilmiş. Bu durum taranan ve '.stl' olarak kayıt edilen modelin CAD programında, düzenlenme ve CAD modele dönüştürme işlemlerinde kolaylık sağlamıştır.



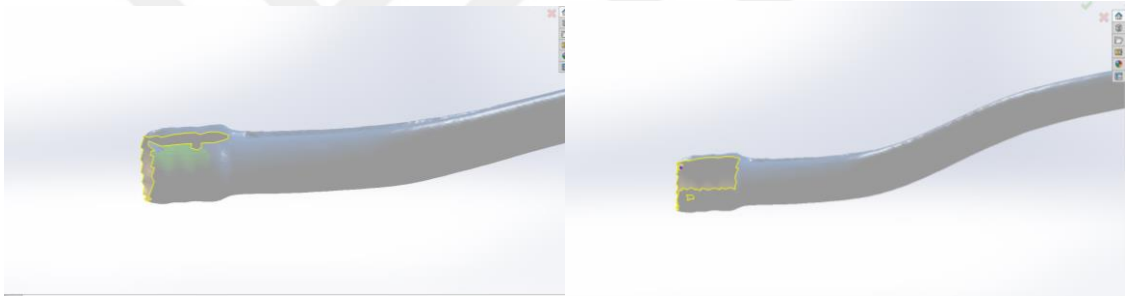
Şekil 3.43. Modelin optik taramayla taranması.

Modelden elde edilen nokta bulutu kendi programında '.stl' formatına dönüştürülmüştür. '.stl' formatında alınan model verileri SolidWorks programına Scan to 3D modülü yardımıyla aktarılmıştır (Şekil 3.44).



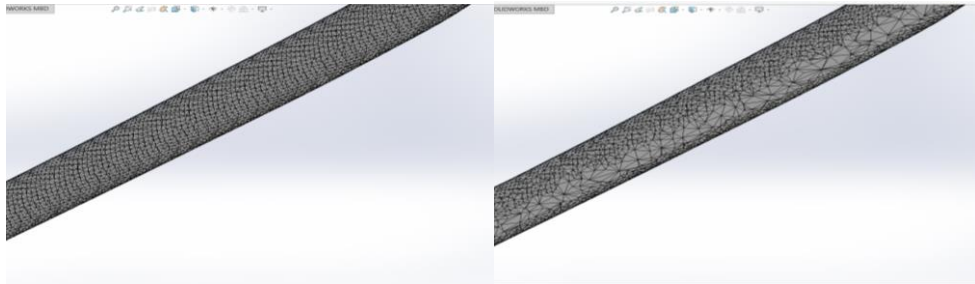
Şekil 3.44. Optik tarama ile elde edilen Mesh'li yapının programa aktarılması.

Modelin programa aktarılmasından sonra Scan to 3D modülünde mesh düzenleme işlemine geçilmiştir. Taramadan kaynaklı model çevresinde oluşan ya da model üzerinde olan gereksiz veriler temizlenmiştir (Şekil 3.45).



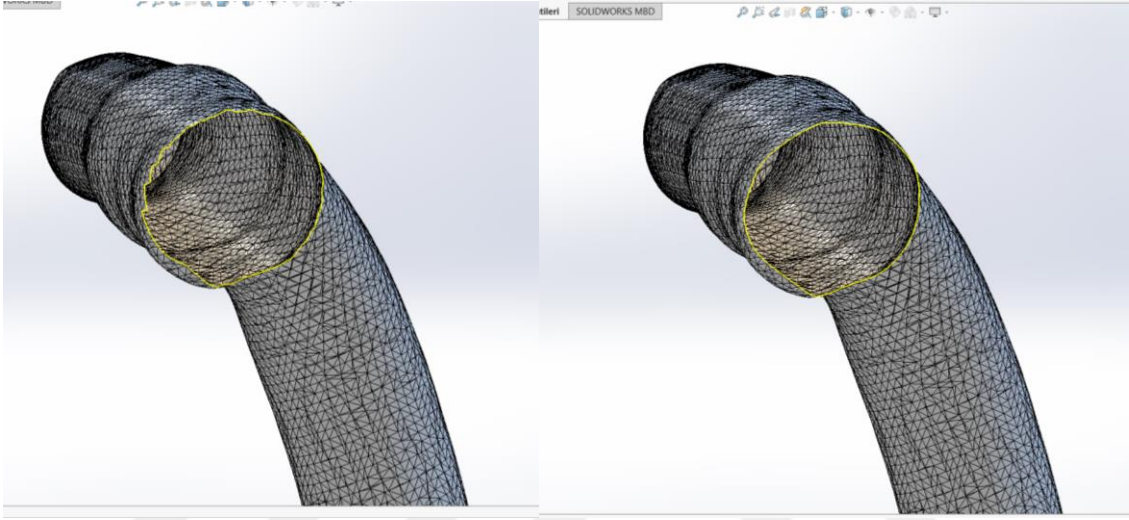
Şekil 3.45. Model çevresinde ya da üzerinde istenmeyen verilerin temizlenmesi.

Mesh boyutun küçültülmesi model üzerinde yapılacak işlemleri hızlandırır ancak mesh boyutunu küçültmek bazen model üzerinde şekil bozukluklarına neden olmaktadır (Şekil 3.46). Bu çalışmada mesh boyutunu küçültmek şekil bozukluğuna neden olduğundan mesh boyutu küçültme işlemi yapılmamıştır.



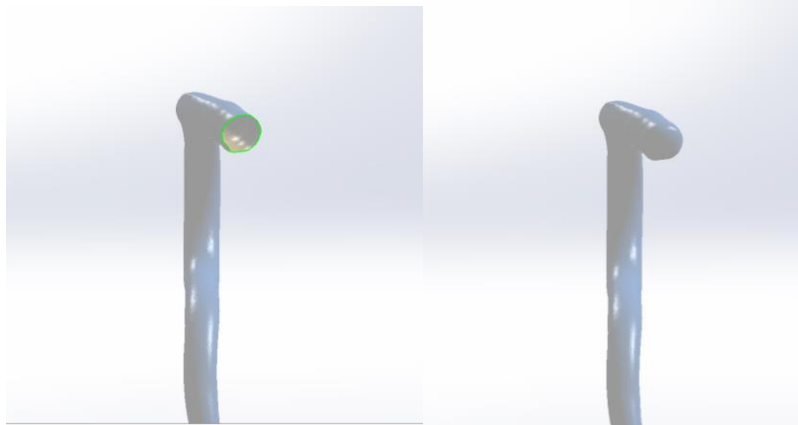
Şekil 3.46. Mesh boyutu azaltıldığında modelde oluşan şekil bozukluğu.

Taranan modelin yüzeyi pürüzlü ise pürüzsüzleştirme işlemi yapmak daha sonra yapılacak işlemleri kolaylaştırır. Bu çalışmada model yüzeyi pürüzsüzleştirme işlemi gerektirmemektedir ancak model sınırlarında girintili çıkıntılı bir yüzey görülmektedir. Sınırlardaki bu pürüzlülüğü gidermek için pürüzsüzleştirme seçeneğindeki sınır pürüzsüzleştirme modülü kullanılmış ,sınırlar pürüzsüz şekle getirilmiştir (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. Model sınırlarının pürüzsüzleştirilmesi.

Model üzerinde doldurulması gerekli boşluklar doldurulmuştur (Şekil 3.48).



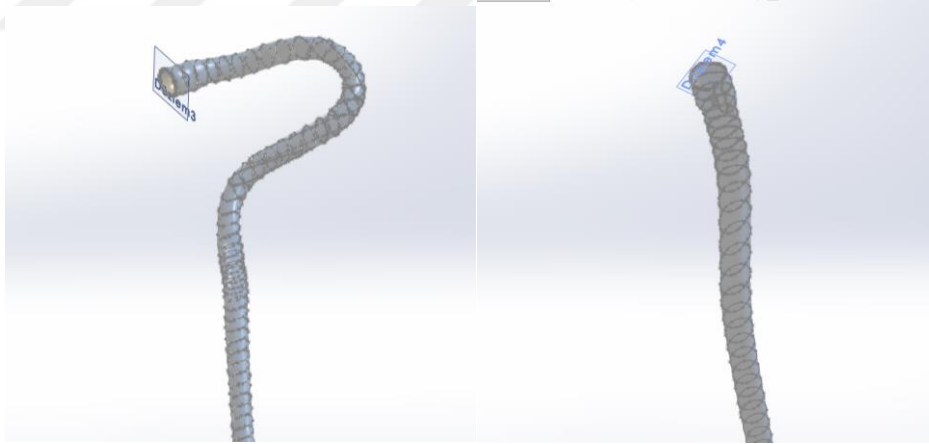
Şekil 3.48. Model üzerinde gerekli olan boşlukların doldurulması.

Modelin yüzey düzenleme işlemleri tamamlanmış, modelin sınırları Scan to 3D içerisindeki eğri oluşturma komutlarıyla belirlenmiştir (Şekil 3.49).



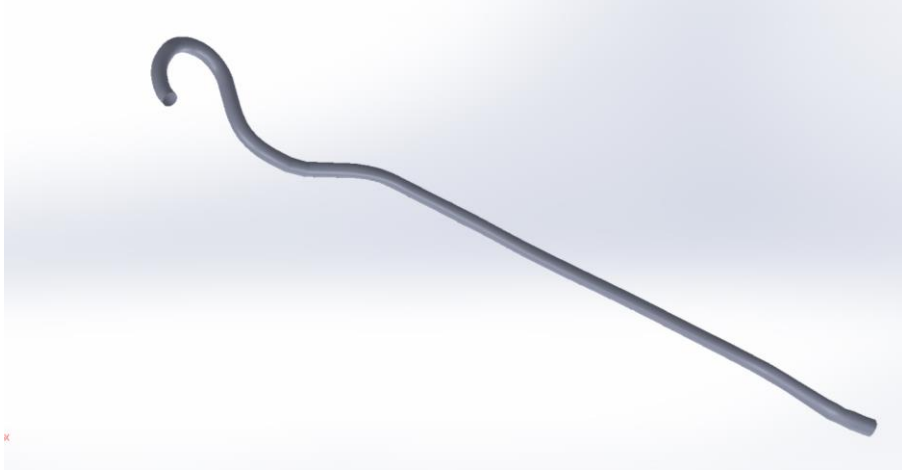
Şekil 3.49. Modelin sınırlarını çıkarma.

CAD modeli oluşturabilmek için gereken yüzeylere düzlemler atanarak modelden kesitler alınmıştır (Şekil 3.50).



Şekil 3.50. Modelden elde edilen kesitler.

Programda bulunan çizim ve yüzeyler modülleriyle gerekli düzenlemeler yapılmış, yüzey oluşturulmuş, modelin dataları elde edilmiştir (Şekil 3.51).



Şekil 3.51. Çalışma sonucunda oluşturulan yüzey.

4. SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Tersine mühendislik, ürünün üretim süreçleri de dahil olmak üzere özelliklerinin ve ürünü oluşturan bileşenlerin birbirleri ile olan ilişkisinin analiz edilmesidir (Chikofsky vd.,1990: İşbilir F. vd.'den,2018). Tersine mühendislikte amaç, ortada hiçbir CAD model yok iken, bir nesnenin gelecek çalışmalarda kullanılmak üzere başarılı bir şekilde 3B CAD modelini oluşturmaktır.

Tersine mühendislik uygulamaları için tasarlanmış Geomagic, Space Claim vb. gibi programlar mevcuttur. Bu programlar nokta bulutundan katı modele dönüşüm işlemlerini hızlıca yapmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen nokta bulutu verileri bu programlar yardımıyla 2D ve 3D çizimlere dönüştürülüp 2D, 3D çizimler üzerinde değişiklikler yapılarak ilk taramadan farklı bir dizayn oluşturulabilir. Bu çalışmadaki amaç Geomagic, Space Claim vb. gibi programlarda yapılan tersine mühendislik uygulamalarının, sıfırdan tasarım yapmak için kullanılan Solidworks programı ile yapılıp yapılamayacağını araştırılmasıdır. Bu çalışmanın yapılmasının amacı SolidWorks programında tersine mühendislik işlemlerinin yapılabilirliğini araştırmaktır. Mevcut CAD yazılımları ile belirli bir boyuta kadar tersine mühendislik işlemlerinin yapılabilmesi, firmaların ikinci bir program için harcayacağı program maliyetini ve personelin yeni programı öğrenme ve adaptasyon zorluklarını ortadan kaldıracaktır.

SolidWorks ile yapılan tersine mühendislik çalışmaları kapsamında hem grift parçalar (yüzeyinde girinti çıkıntısı fazla olan ya da iç yapısında çap daralmaları olan) hem de basit parçalar (yüzeyinde girinti çıkıntı az olan, düzgün geometrik şekle sahip) nokta bulutundan katı modele çevrilerek CAD dataları oluşturulmuştur. Basit parçaların istenilen kalite CAD dataları elde edilmiştir. Grift parçaların ise CAD dataları istenilen kalitede elde edilememiştir.

Tersine mühendislik işlemlerini gerçekleştirebilmek ve istenilen kalitede katı model elde edebilmek için parçanın 3D cihazlarla yapılan tarama işlemi son derece önemlidir. Eksik ya da hatalı tarama tersine mühendislik işlemlerinin gerçekleştirilmesini zorlaştırır. Parçanın tekrar taranması işlemlerin tekrar edilmesi gerekebilir. Eksik ya da hatalı tarama zaman ve motivasyon kaybına neden olur. Ayrıca yapılan tersine mühendislik çalışmalarında grift parçaların mesh boyutu azaltıldığında oluşturulan katı model ile başlangıçtaki mesh yapı arasındaki ölçü farklılıklarının arttığı görülmüştür. Mesh boyutu azaltılırken parçanın ana yapısındaki önemli unsurların (köşeler, delik çapları vb.) veri kaybına uğramamasına dikkat edilmelidir.

Endüstrimizde tasarım için hali hazırda SolidWorks programı kullanan ve basit parçalar için tersine mühendislik işlemlerini uygulayan firmalar, bu işlemler için ek maliyet getiren ikinci bir program satın almak yerine SolidWorks programını kullanabilirler.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdel, M. ve Ebrahim, B. (2015). 3D Laser Scanners Techniques Overview, *International Journal of Science and Research*, 4(10), 323-33.
- Babic, M., Veric, Ö., Bozic, Z. & Susic, A. (2019). Fracture Analysis of a Total Hip Prosthesis Based on Reverse Engineering, *Engineering Fracture Mechanics*, 215(2019), 261-271.
- Babić, M., Verić, O., Božić, Z. & Sušić A. (2013). A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models, www.elsevier.com/locate/cad 45(2013), 1382-1393.
- Bakhshi, R. (2011). 3D Modelling of Buildings and Environments using Laser Scanning and Surface Reconstruction, Yüksek Lisans Tezi, Eastern Mediterranean University, KKTC,113s.
- Bauer, F., Schropp, M. & Szijarto, J. (2019). Accuracy Analysis of a Piece-to-Piece Reverse Engineering Workflow for a Turbine Foil Based on Multi-Modal Computed Tomography and Additive Manufacturing, *Precision Engineering*, 60(2019), 63-75 .
- Benli, G. ve Görmüş E. E. (2017). Rölövede Yersel Lazer Tarayıcının Katkısı Üzerine Bir Örneklem; Tarihi Yarımada'daki Sarnıçlı Han ve Avlusundaki Sarnıç, *Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi E- Dergisi*,12(3),420-428.
- Chougule V. N., Mulay A. V. & Ahuja B. B. (2014). Development of patient specific implants for Minimum Invasive Spine Surgeries (MISS) from non-invasive imaging techniques by reverse engineering and additive manufacturing techniques. *Procedia Engineering*, 97(2014), 212 – 219.
- Çetinel, M. (2008). Tersine Mühendislik ile Üç Boyutlu Cisimlerden Grafik Model İçin Veri Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,142s.
- Çifci, U., Özkan, A. ve Taşdemirci, Ç. (2019). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Hızlı Prototip Uygulamaları için Farklı Materyaller Aracılığıyla Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2019),1627-1643.
- Demir, H. (2018). CAD Datası Olmayan Parçaların Tersine Mühendislik Metodu ile CAD Datalarının Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 114s.
- Engel, B. & Al-Maeni, H. S. S. (2019). An Integrated Reverse Engineering and Failure Analysis Approach for Recovery of Mechanical Shafts. *Procedia CIRP*, 81(2019), 1083–1088.
- Eren, O., Sezer, H. K. ve Börklü, H. R. (2018). Tersine Mühendislik Tasarımı: Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Lisans Öğrencileri için Teknik Seçmeli Ders, *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 2-3(2018), 1-11.
- Gümüş, K. ve Erkaya, H. (2007). TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Günpınar, E. (2016). Tersine Mühendislik Yoluyla Üç Boyutlu Geometrik Modelin Oluşturulması ve Gemi Yapım Endüstrisindeki Bazı Uygulamaları, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(3), 624-639.

<http://biyokam.gazi.edu.tr>.

<http://www.tulga.com.tr/hizmetlerimiz/tersine-muhendislik/3-boyutlu-tarama/>.

http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/dda376bcc160b1_ek.pdf.

<https://architecturenow.co.nz/articles/future-thinking-iv-3d-scanning/>.

<https://tr.pinterest.com/pin/316870523774429258/>.

<https://tr.wikipedia.org/wiki/Ölçme>.

<https://www.faro.com/tr-tr/resources/makaleler/>.

<https://www.hexagonmi.com/tr-TR/products/coordinate-measuring-machines>.

<https://www.officer.com/command-hq/technology/>.

<https://www.olymposdesign.com/tr/makaleler/3d-optik-taramanın-temel-prensibi>.

<https://www.poligonmuhendislik.com/hizmetlerimiz/kalite-kontrol-ve-raporlama/3-boyutlu-olcum/optik-tarama>.

Işık, U. (2019). Üç Boyutlu Koordinat Ölçme Cihazı (CMM) ile Optik Tarama Cihazının Performanslarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 54s.

İçke, R. Ö. ve Tuncer, O. (2016). Bir Mikro Turbo Jet Motorun Ters Mühendislik ile İncelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 18(3), 562-579.

İşbilir F., Çelik B., Özsan, A. ve Kaynak M. F. (2018). Tersine Mühendislik Temelli Araç Üstyapı Tasarım, Analiz ve Üretiminin İncelenmesi, *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 1(2), 72-79.

Kaplan, A. (2016). Francis Tipi Türbin Çarkının Tersine Mühendislik ile Tasarımı ve Rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 102s.

Karkınlı, A. E. (2011). Çizgi Lazer Tabanlı 3D Tarayıcı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ercyes, 49s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Önçağ, A. Ç., Tekcan, Ç. ve Özden, H. (2017). Mekanik Parçaların Tersine Mühendislik ile Modellenmesinin Değerlendirilmesi ve Bir Uygulama, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 43-49.

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 Makina*, 55(64), 35-60.

Sarı, M. İ. (2019). Tersine Mühendislik Yaklaşımı ile Antibakteriyel Antimikrobiyal Ortez Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 98s.

Sofu, M. M. (2019). Bozuk Kalıp Elemanın Tersine Mühendislik Uygulaması ile İmalatı, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 272-281.

Şahin, İ., Şahin, T., Gökçe, H. ve Eren, O. (2017). Hasarlı Dişlilerin Tersine Mühendislik Yaklaşımıyla Yeniden Oluşturulması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2017), 485-495.

Şahin, O. (2018). Tersine Mühendislik Yöntemi ile Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve Kalıp Dolum Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 63s.

Türküçü, T. ve Börklü, H. R. (2018). Tersine Mühendislik Yaklaşımına Dayalı Yeni Bir İmalat İçin Tasarım İşlem Modeli, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 91-104.

Yıldız, Ö. (2017). Havacılıkta Tersine Mühendislik Uygulamaları, IX. Ulusal Uçak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı Bildiriler Kitabı Oturum XI, 135-154.

Zhang, H., Li, L. & Zhao, J. (2019). Robot Automation Grinding Process for Nuclear Reactor Coolant Pump based on Reverse Engineering, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(2019), 879–891.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : IŞIK, Ebru

Doğum Tarihi ve Yeri : 17/09/1989 Osmangazi

Eğitim

Yüksek Lisans: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.

Lisans: Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği, 2012.

Lise: Bursa Kız Lisesi, Fen Bilimleri, 2007.

İş Denevimi

Yıl	Yer	Görev
2017	Ateco Tank	Planlama Mühendisi
2014	Işık Mühendislik	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İyi seviyede İngilizce

Başlangıç seviyesinde Almanca