



# Mekanik parçaların tersine mühendislik ile modellenmesinin değerlendirilmesi ve bir uygulama

## Assessment and application of modeling mechanic parts with reverse engineering

Ali Çağlar ÖNÇAĞ<sup>1\*</sup>, Çağdaş TEKCAN<sup>2</sup>, Hüseyin ÖZDEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ESHOT Genel Müdürlüğü, İzmir, Türkiye.  
alicaglar8@hotmail.com

<sup>2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.  
cagdastekcan@gmail.com; huseyin.ozden@ege.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 30.05.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 28.04.2017

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.05925  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu çalışmada, günümüz endüstri alanlarının birçoğunda uygulanan tersine mühendislik yöntemi ile ilgili mekanik parçalara yönelik literatürde yapılmış çalışmalar incelenmiş ve bir iş akışı oluşturulmuştur. Bu akış dikkate alınarak hem yüzey hem katı modelleme yapılabilecek bir otobüs turboşarj dirseği-çıkışı üzerinden taşınabilir koordinat ölçüm makinası (KÖM)'na entegre edilmiş bir üç boyutlu (3B) lazer tarayıcısıyla taranmış ve parça modellenmiştir. Tarama sonucu elde edilen nokta bulutu kullanılarak tasarlanan bilgisayar destekli tasarım (BDT) modeli üzerinden bire bir ölçekte 3B baskı alınmıştır. Çalışma sonunda uygulamanın akışa göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Böylelikle tersine mühendislik yazılımlarında hem yüzey modelleme çalışmalarının hem de katı model tasarımların birbirine entegre edilebildiği görülmüştür. Ayrıca serbest formlu yüzeylere sahip parçaların tersine mühendislik uygulamalarına üç boyutlu yazıcıların kolaylıkla entegre edilebileceği görülmüş ve 3B yazıcı kullanımının tersine mühendislik uygulamalarının standart bir parçası haline gelebileceği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Tersine mühendislik, İş akışı, 3B lazer tarama

### Abstract

In this study, several reverse engineering applications which mainly being used in many industrial areas have been investigated and a workflow has been formed. According to this workflow, a bus turbo unit outlet/connection with both surface and solid model capabilities has been scanned by a three dimension (3D) laser scanner integrated to a portable coordinate measuring machine (CMM) and a digital model has been created. A 1/1 scale three dimension part has been printed via computer aided design (CAD) model created from the point cloud acquired from laser scanning operation. This application has been evaluated according to the workflow. Therefore, it has seen that surface modelling and solid design methods can be integrated with reverse engineering software in various applications. In addition, it has seen that 3D printers can be adopt easily to the applications of reverse engineering of the parts having freeform surfaces and the use of 3D printers can be a standard part of the reverse engineering process.

**Keywords:** Reverse engineering, Workflow, 3D laser scan

## 1 Giriş

Tersine mühendislik bir nesnenin kopyasını ya da fonksiyonel olarak yeniden konstrüksiyonunu yapmak için bir ölçme, analiz ve test süreci olarak tanımlanabilir. Uygulamada tasarım bilgileri olmayan parçaların üretilmesinde, hasarlı parçaların analiz edilerek tamiri veya yeniden üretiminde, var olan bir parçaya dayanarak daha farklı bir ürün geliştirilmesinde, prototip üretmede vb. amaçlarla kullanılmaktadır [1],[2].

Rekabet koşulları firmalara tasarım süreçlerine ayrılan sürelerin azaltılması amacıyla süreci geliştirecek yeni yollara sevk etmiş ve bilgisayar teknolojisi ile dijital veri toplama ekipmanlarının gelişimi sayesinde tersine mühendislik yöntemleri tasarım süreçlerine dâhil olmuştur [1]-[17].

Tersine mühendislik uygulamaları kendisine makine, otomotiv, havacılık, medikal, dental, tarihi ve hatta ziraat gibi farklı alanlarda kullanım yeri bulmaktadır. Bu kapsamda son 20 yıldır bu konu üzerine çalışmaların yapılmasına devam edilmekte ve bu alandaki teknoloji gün geçtikçe hem yazılım hem de donanım yönünden daha da ileri gitmektedir [1]-[17]. Bu bağlamda makalede 2. Bölümde makine ve benzeri sektörlerdeki yapılan literatür çalışmaları değerlendirilmekte 3. Bölümde 2. Bölümde yapılan değerlendirme ışığında tersine

mühendislikte kullanılan ekipmanlar kısaca değerlendirilerek bir iş akışı oluşturulmaktadır. 4. Bölümde ise söz konusu akış temel alınarak bir uygulama yapılmaktadır. 5. Bölümde önceki bölümlere dayalı olarak yapılan araştırma ve çalışmanın değerlendirme ve sonuçları sunulmaktadır.

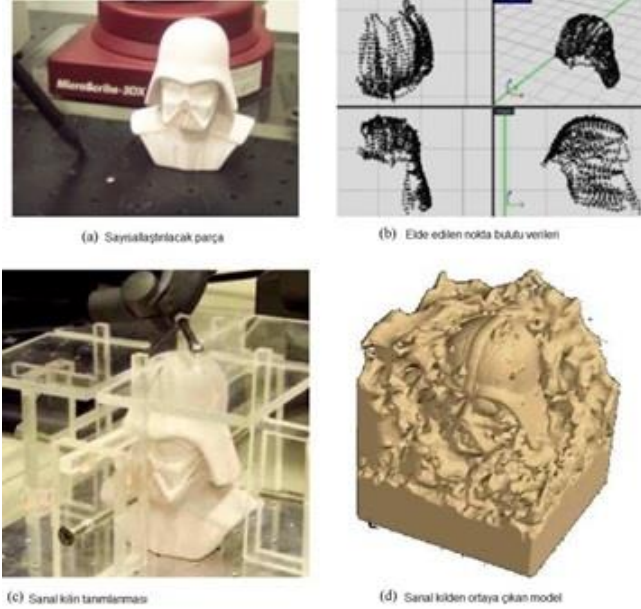
## 2 Literatürde yapılan çalışmalardan örnekler

Literatürde tersine mühendislik uygulamaları üzerine farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan endüstriyel veya sanatsal tasarımları temel alanlar haricinde mekanik parçalar üzerine çalışılanlardan ve makine vb. sektörlerde hizmet edebileceklerden bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

Lee ve Woo yaptıkları çalışmada parçalardan dijital olarak elde ettikleri nokta bulutlarındaki noktaların sayılarının azaltma yoluna gitmiş ve yüzey modelleme çalışması yapmadan doğrudan hızlı prototipleme gerçekleştirmişlerdir. Nokta bulutlarında yüzde seksenlere varan azaltma gerçekleştirmişlerdir [3]. Yayının yapıldığı günden bugüne gelindiğinde, günümüzde nokta sayısı azaltma işlemi pek çok tersine mühendislik uygulama akışında yazılımlar sayesinde standart uygulanan işlemlerden biri haline gelmiştir.

Yang ve Chen tersine mühendislik için tarayacakları parça etrafında kullandıkları yazılımlar vasıtasıyla sanal bir kil blok yaratmış, altı eksenli temaslı koordinat ölçüm makinası

kullanarak, prob parçaya her dokunduğu yerde yine sanal olarak kil üzerinden talaş kaldırıp, voksel ve poligon model elde etmişlerdir. Elde edilen modellerden son olarak hızlı prototipleme ile üretim yapmışlardır. Yapılan işleme ait görünüm Şekil 1'de görülmektedir [4].



Şekil 1: Sayısallaştırma ve hacim boşaltmanın karşılaştırılması [4].

Mian ve diğ. çalışmalarında temaslı problu sistem KÖM ile (çizgi) lazer taramayı birleştirmişler, geometrik şekillerin dijitalleştirilmesinde temaslı problu sistem geometrik olmayan yüzey formlarında ise lazer tarama kullanmışlardır. Böylelikle geometrik verilerin eldesinde lazer taramada ortaya çıkan veri kirliliğinden temaslı prob kullanarak kurtulmuşlardır. Ayrıca temaslı prob ile taranması nispeten verimsiz olan karmaşık yüzey formlarını lazerle tarayarak söz konusu hibrit sistem ile tersine mühendislik için bir avantaj elde etmişlerdir [5].

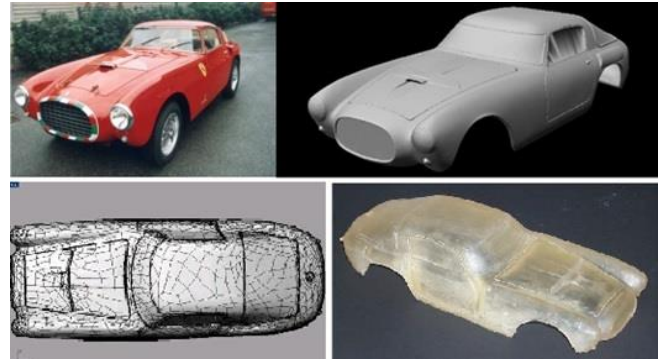
Dúbravčík ve Kender, yaptıkları çalışmada lazerli ve temaslı problu taşınabilir bir ölçüm kolu ve PolyWorks ile Catia yazılımları kullanarak hasarlı bir dişli parçasını taramış ve BDT modelini oluşturmuşlardır. Tarama işlemi öncesinde lazerin parça üzerinden saçılarak gürültü yaratmasını önlemek amacıyla parçaya kaplama yapmışlardır. BDT modelleme sırasında kayıp ve aşınmış olan hasarlı bölgeleri de göz önünde model oluşturmuşlardır. Son olarak oluşturulan modelin 3B yazıcıda prototipini üretmişlerdir [6].

Sansoni ve Docchio Ferrari 250 Mille Miglia antika arabayı optik dijitalleştirici (tarayıcı) ile taramış ve taranan veriden .stl uzantılı mesh dosyası oluşturarak üç boyutlu yazıcıdan 1/10 ölçekli çıktı almışlardır. Ayrıca düzgün olmayan rasyonel Bezier eğrileri (İngilizce NURBS) ile BDT modeller oluşturmuş ve tarama verisi ile arasındaki sapma miktarını değerlendirmişlerdir. Böylelikle büyük boyutlardaki yüzeylerin üzerinde tersine mühendislik yöntemlerinin uygulanabileceğini göstermişlerdir (bkz. Şekil 2) [7].

Xu ve diğ. tarımda kullanılan pulluk ile toprak arasındaki direncin azaltılabilmesi amacıyla pulluk tasarımında kullanılabileceğini düşünerek bir domuz kafası üzerinde tersine mühendislik yöntemlerini kullanmışlardır. Bir yaban

domuzu kafası bir 3B lazer tarayıcı ile taranmıştır. Tarama sonunda elde edilen nokta bulutu kullanılarak CATIA programında yüzey model oluşturulmuştur. Elde edilen verilerin pulluk tasarımında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [8].

Literatür örneklerinden görüleceği üzere tersine mühendislik uygulaması ihtiyaca göre farklı amaçlar için uygulanabilmektedir. Bununla birlikte çalışmada geçmiş yıllardan günümüze kadar farklı donanım ve yazılımların kullanıldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca çalışmada dijital modelin prototip ile doğrulanması veya doğrudan ürün olarak kullanılması amacıyla 3B yazıcıların da çalışmaların parçası olarak kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2: Ferrari 250 Mille Miglia antika araba ve sırasıyla tarama sonrasında oluşturulan üçgen mesh (ağ örgüsü) hali, yüzey model hali ve 1/10 ölçekli 3B yazıcıdan alınan çıktısı.

### 3 Tersine mühendislikte kullanılan ekipmanlar ve iş akışı

Tersine mühendislikte kullanılan ekipmanları temel olarak donanımlar ve yazılımlar olarak ikiye ayırmak mümkündür. Donanımlar ise temaslı ve temassız ölçüm ekipmanları olarak iki ana gruba ayrılabilir. Temaslı ölçüm donanımları en hassas fakat aynı zamanda da en yavaş yöntemlerdir. Bunun yanı sıra serbest yüzeylerden veri elde edilmesi de diğer yöntemlere göre daha zor olmaktadır. Bu tip ölçüm yöntemini kullanan donanımlardan en bilinenin Koordinat Ölçüm Makinalarıdır (KÖM)[2]. KÖM'ler amacına göre farklı yapı ve boyutlarda üretilebilmektedir. Bazı KÖM'ler sabit ve bilgisayar kontrollü tezgâhlar halinde olabilirken bazıları seyyar kullanıma uygun şekilde taşınabilir olarak tasarlanabilmektedir. Taşınabilir KÖM'lerin avantajı üretim sahasına taşınabilmesi ve ölçüm sınırlarından büyük parçaların ölçümlerinin çeşitli aparatlar ve yazılımlar vasıtasıyla yapılabilmesidir [9]-[11]. Temassız yöntem kullanan donanımlar genellikle nirengi metodu kullanılmaktadır. Nirengi (triangulation), pozisyon bulmak için foto algılama cihazı ile ışık kaynağı arasında konum ve açı kullanan bir metottur. Bu metotta yüksek enerjili ışık kaynağı ilgili parçanın yüzeyine önceden belirlenmiş bir açıda odaklanmakta ve gönderilmektedir. Işığa duyarlı kamera parçanın üzerinden yansıyan ışığı algılamakta ve sonra bilinen açı ve mesafeye göre geometrik nirengi kullanarak parça yüzeyinin pozisyonu referansa göre hesaplanmaktadır. Bu metodu kullanan donanımlarda farklı tipte ışık kaynakları kullanılabilmekte ancak yaygın olarak lazerler kullanılmaktadır. Bazı lazer tarayıcı modelleri KÖM'larına da entegre edilebilmektedir. [2] Diğer bir donanım tipi Yapılandırılmış aydınlatma (Structured lighting) kullanan donanımdır. Bu metotta ölçüm yapılacak yüzeyin üzerine desenlendirilmiş ışık yansıtılmakta ve yüzey üzerinde

yansıyan desen sonuçlarının görüntüsü yakalanmaktadır, sonrasında veri noktalarının koordinatlarının belirlenmesi için görüntülerin analiz edilmesi gerekmektedir [2],[12] Bu metod dışında farklı metotlar kullanan ekipmanlarda mevcuttur [2],[17]. Ancak yapılan çalışmalarda çoğunlukla KÖM'lerin, lazer tarayıcıların ve yapılandırılmış aydınlatma yönteminin kullanıldığı görülmektedir [3]-[8],[17].

Yazılımlar incelendiğinde verilerin toplanmasında ve işlenmesinde amaca uygun farklı programlar kullanılabilir. Kullanılacak yazılımın donanım ile uyumlu çalışması ya da donanım vasıtası ile elde edilen verilerin işlenmesine izin vermesi gerekmektedir. Makine endüstrisinde parça tasarımlarında 3 boyutlu dijital tasarıma imkân tanıyan BDT programları kullanılmaktadır. Bununla birlikte her BDT programı ile tersine mühendislik çalışmaları yapılamamaktadır. Tersine mühendislik çalışmalarının yapılabildiği yazılımlara Alias Design, PowerSHAPE, Geomagic Design X gibi programlar örnek gösterilebilir. Her programın birbirine göre avantajları veya dezavantajları bulunmaktadır. Örnek olarak Alias Design ile yüksek kalitede yüzey modeller tasarlanabilirken katı model çalışmaları yapılamamaktadır. Katı model tasarımları için Geomagic Design X gibi parametrik modelleme programlarını tercih etmek gerekmektedir [13]-[15].

Tersine mühendislik uygulaması, amaç bir makine parçası üzerinde çalışma yapılması olduğunda sürecin akışı tarih, medikal, dental gibi alanlardan hem kullanılan ekipman hem de akışın adımları konusunda ayrışabilmektedir. Şekil 3'te makine parçaları için (otomotiv, havacılık vb. alanlarda buna dâhil edilebilir) bir iş akışı verilmiştir. İş akışı incelendiğinde işlemin, amacı seçme ile başladığı ve parçanın geometrisine göre temaslı temassız ölçüm ekipmanlarının hangisinin seçileceği ve bu seçime göre yapılan işlemlerin anlatıldığı görülmektedir. Lazerli veya temassız bir ölçüm aleti kullanılarak yapılan taramada parça geometrisine göre NURBS eğrileri kullanılarak yüzey modelleme ve katı modelleme işlemi veya bunların her ikisi birden seçilerek modelleme yapılabilmektedir. Temaslı bir ölçümleme işlemi yapıldığında ise katı modelleme işlemi yapılmaktadır. Ayrıca ölçümlenen parçanın serbest formlardan ziyade silindirik, küre, koni gibi geometrik formların birleşimi veya birbirinden çıkarılmasından oluşmuş olması gerekmektedir. Serbest formlu bir parçanın temaslı prob kullanan bir KÖM ile ölçülmesi süreci temassız ölçüme kıyasla oldukça uzatacaktır.

1, 2 ve 3. Bölümlerde anlatılanlar ve Şekil 3'te oluşturulan iş akışı dikkate alınarak bir uygulama yapılmış ve 4. Bölümde uygulama adımları anlatılmıştır.

#### 4 Uygulamalar

Bir otobüsün egzoz sisteminin parçası olan turboşarj dirseği, Romer 7325 6 eksen KÖM'a entegre edilmiş HP-L-8.9 3B Lazer tarayıcı ve Geomagic Design X programı kullanılarak taranmıştır. Uygulamalar ESHOT Genel Müdürlüğü laboratuvarında yapılmıştır. Tarama işlemi orijinal parça üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kullanılan tarayıcının özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tarama sırasında parça bir pozisyonda sabit tutulmuş ve kolun hareketiyle pek çok farklı açıdan tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te görülebildiği gibi turbo şarj dirseğin hem serbest form hem de katı model unsurları içeren bir geometrik şekle sahiptir. Parçanın alt ve üst-uç kısımları

silindirik ve prizmatik geometrilere sahip iken orta-kıvrımlı yüzeyler serbest formdur.

Tablo 1: Lazer tarayıcı özellikleri [18].

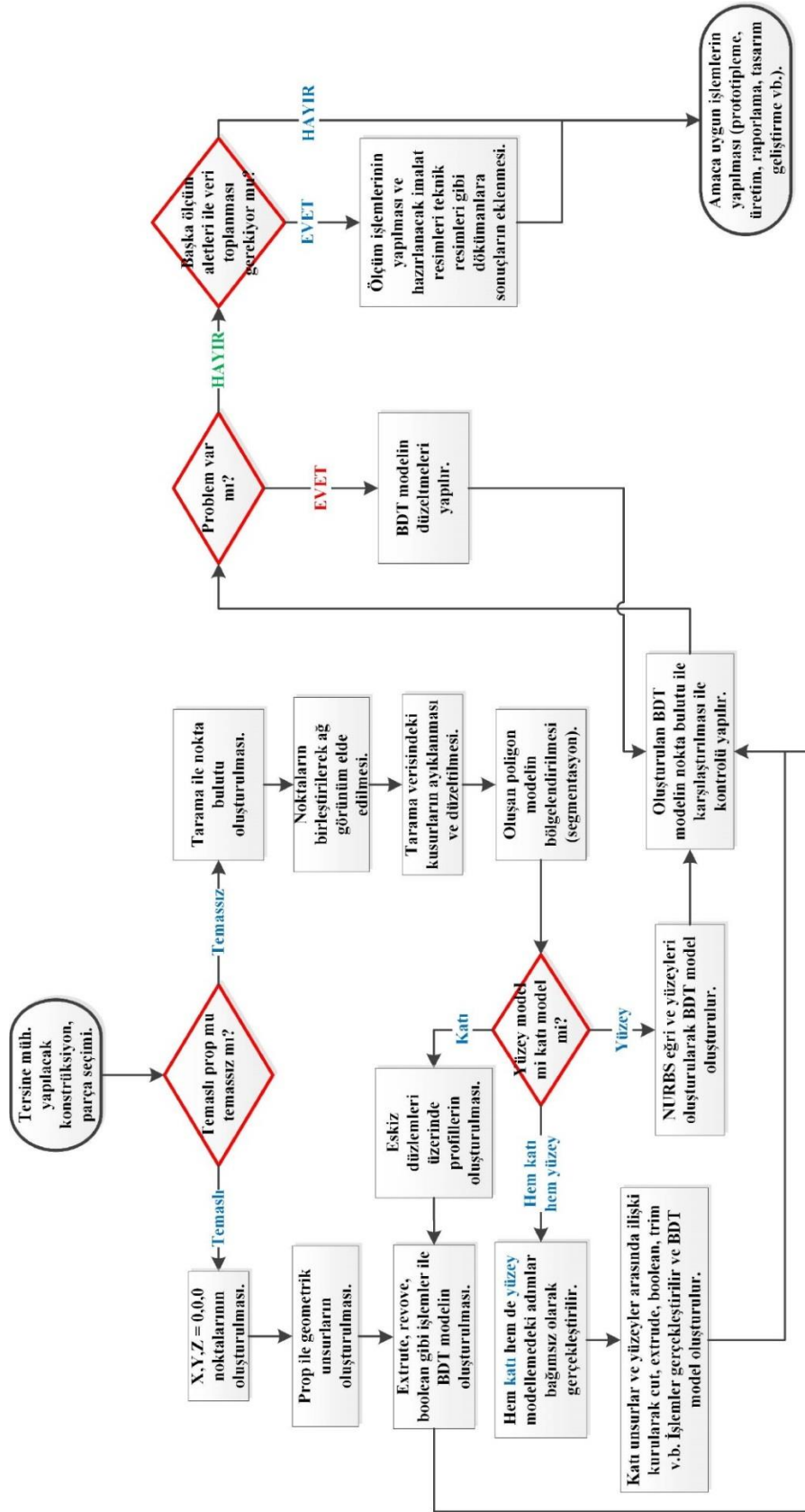
Hassasiyet	40 µm 2 sigma
Nokta alma yeteneği	45000 nokta/saniye
Çizgideki nokta sayısı	750
Çizgi yenileme frekansı	60 Hz
Tarama genişliği (orta alanda)	80 mm
Algılama mesafesi	135 mm +/- 45 mm
Minimum nokta aralığı	0.08 mm
Lazer güç ayarlaması	Yarı otomatik

Dairesel simetriye sahip parçalar dışında genellikle tarama işlemi esnasında parçanın bütün yüzeylerinden veri toplamak gerekir. Bu durum taranan parçaların altta kalan ve ilk taramada veri alınamayan kısımları için ayrı ayrı taramalar yapılmasına sebep olmaktadır. Ayrı ayrı yapılan bu taramalardan elde edilen veriler daha sonra nokta çiftleri ile birbirine karşılaştırılmakta ve parçanın bütün halinin her bir detayı dijital ortama aktarılmış olmaktadır. Tarama işlemi esnasında, lazer tarayıcının kalitesi ve tarama yapılan parçanın yüzey pürüzlülüğü, rengi, şeffaflığı ve parlaklığı gibi farklı parametreler sebebiyle gereğinden fazla ve/veya eksik veri elde edilmesi gibi durumlar oluşabilmektedir. Fazla veri elde edildiği durumlarda, dosya boyutunun artması, yazılımda işlem yapma hızının düşmesi ve yansımalar ile elde edilen noktalardan dolayı ileride oluşturulacak BDT modelinin tarama verilerinden ne kadar saptığının sağlıklı bir şekilde belirlenmemesi gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Öte yandan eksik veri elde edildiği durumlar söz konusu olduğunda, BDT modelinin düzgün bir biçimde oluşturulamaması veya tarama verilerinden ne kadar saptığının belirlenememesi gibi durumlar ortaya çıkmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, yapılan tarama işlemlerinin ardından elde edilen veriler, herhangi bir modellemeye başlamadan önce yeniden düzenlenmek durumunda kalırlar.

Kullanıcılar yazılım ara yüzündeki parçaya ve işleme en uygun komutları kullanarak, gerekli gördükleri iyileştirmeleri yaparlar.

Dosyada farklı açıdan yapılmış birbirinden bağımsız tüm taramalar Geomagic Design X programının "Mesh Built Up Wizard" (ağ örgüsü hazırlama sihribazı) komutu ile birleştirilmiş fazlalık kısımlar seçilerek silinmiş, bulunan gürtüller ayıklanmıştır. Ayrıca "Healing Wizard" (onarım sihribazı) komutu ile ağ örgüsü hataları önemli ölçüde ayıklanmış, (düzlemsel bölgelerde açığı yapmış ağ örgü yüzeyleri, birbiri ile çakışan ağ örgüleri vb.) "Global Remesh" ve "Optimize Mesh" (genel ağ örgüsü yapılandırma ve en uygun ağ örgüsü düzenleme) ile ağ örgüsü yeniden örülmüş ve optimize edilmiştir. Bu işlemler sonucunda poligon (ağ örgü) modelde kullanılan nokta sayısı ve dosya boyutu önemli ölçüde düşürülmüştür. Nokta bulutu ve mesh düzeltme sonrasındaki bazı görüntüler Şekil 5'te gösterilmektedir.

Nokta bulutu ve ağ yapısını düzeltmenin ardından oluşturulacak BDT modelin başka bir programda açılması sonrasında yapılacak revizyon veya üretim işlemlerinde sorun yaşanmaması için yeniden hizalama, diğer bir ifade ile "x, y, z" Kartezyen koordinat değerlerinin "0, 0, 0" değerlerinin yeniden oluşturulması ihtiyacı doğmaktadır. Bu hizalama işleminin ardından oluşan yeni referans noktalarına göre BDT modeli oluşturulmaya başlanmıştır. Bu tarz hem serbest form hem de katı model unsurlarına sahip bir parçada, ilk önce hangi kısımların hangi yöntemle oluşturulacağı belirlenmiştir.

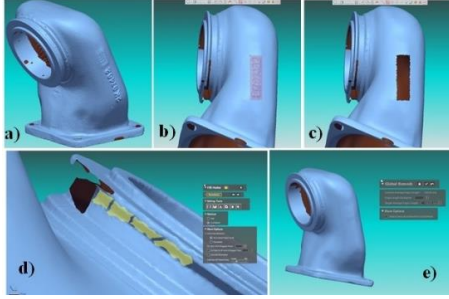


Şekil 3: Tersine mühendislikte iş akışı.





Şekil 4: Orijinal turbo şarj dirseği ve 3 boyutlu yazıcıdan alınan çıktı (turuncu).

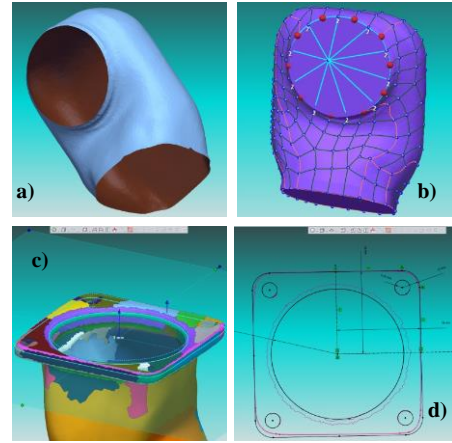


Şekil 5: (a): Taramadan sonraki ilk ağ yapısı. (b): Gerekli olmayan detayların saptanması. (c): Gerekli olmayan detayların silinmesi. (d): Boşlukların onarılması. (e): Ağ yapısının son hali.

Havanın giriş ve çıkış kısmına bağlanan, diğer parçalara montajı yapılan silindirik kısımların daha basit olan katı modelleme komutlarıyla oluşturulması mümkünken, boyun kısmı serbest forma sahip olmasından dolayı yüzey modelleme yöntemleriyle (NURBS kullanımı ile) oluşturulmuştur. Mevcut iyileştirilmiş ağ örgüsü (mesh) oluşturulan düzlemler yardımıyla katı ve yüzey modellemede kullanılma durumuna göre Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi ayrılmıştır. Ayrılan ağ örgüsünün boş kısımları oluşturulacak yüzeyin daha sonra kolaylıkla katı hale getirilebilmesi amacıyla tam kapalı/su geçirmez hale getirilmiştir. Bu işlemin ardından yüzey modelleme ile oluşturulan kısım "Auto Surface" (otomatik yüzey) komutunun kontrollü bir şekilde uygulanması ile Şekil 6(b)'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Serbest forma sahip yüzeylerin oluşturulmasında düzgün olmayan rasyonel Bezier eğrileri (NURBS) eğrilerini temel alan farklı komutlar ile manuel bir yüzey tasarımı da yapmak mümkündür. Zamanı verimli kullanma bakımından ve parçanın hassasiyeti göz önünde bulundurularak yazılımın "Auto Surface" komutu tercih edilmiştir. Bu uygulamada da görülebileceği gibi günümüzde bu alandaki yazılımların sürekli gelişimi ile kullanıcı odaklı kolaylıklar giderek artmaktadır.

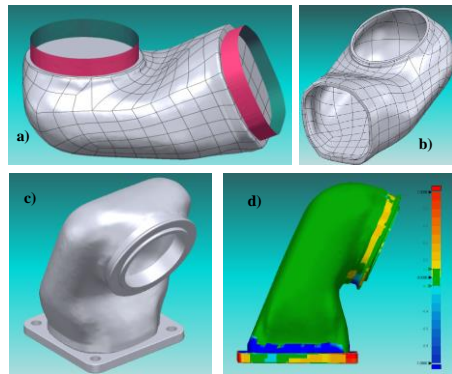
Şekil 6(c) ve Şekil 6(d)'de görülebileceği gibi katı modelleme unsurları ile oluşturulan kısımlar için ilk adımın, deliklerin çaplarının doğru ve hassas bir biçimde saptanması olduğu söylenebilir. Ardından ekstrüzyon, boşaltma, köşe yuvarlatma ve pah kırma gibi bilinen basit komutlarla katılama işlemi tamamlanmıştır. Burada Şekil 6d'de pembe renkteki kısımlar taranan verilerin bir düzlemlerle kesildiğinde elde edilen iz düşüm olmakta ve siyah kısımlar bu iz düşümler dikkate

alınarak oluşturulmuş, modellemede kullanılan çizgi ve ölçüler olmaktadır. Özellikle uzun süre kullanılmış ve deforme olmuş parçalara tersine mühendislik uygulanırken tasarımcının kendi toleransı önemli bir husustur. Örneğin tarama ile elde edilen verilere göre simetrik olması gereken bir kısım simetrisini yitirmiş olabilir. Öte yandan ölçülen değere göre herhangi bir deliğin yarıçapı 17.548725 mm gibi tolerans değeri yönünden ulaşılması ve üretilmesi imkânsız değerlerde saptanabilir. Böyle durumlarda tersine mühendislik uygulayan kişi, parçanın kullanım alanı ve malzemesine göre uygun ve olması gereken aralıkta bir değer atamak durumunda kalabilmektedir.



Şekil 6: (a): Yüzey modelleme ile oluşturulacak kısım için ayrılan ağ örgüsü. (b): Auto Surface komutunun kontrolü. (c): Kesin çap ölçüsünü daha sağlıklı elde etmek üzere 3 mm kalınlıktaki bir kısımdan ortalama çap belirlenmesi. (d): Taban kısmının katı modellemesi için oluşturulan eskiz düzlemi.

Parçanın yüzey modelleme ile oluşturulan kısmı tam kapalı olduğundan otomatik olarak katılaştırılmıştır. Bu işlemin ardından iç kısımdaki boşluğun verilmesi için, dış kısımdaki poligon (ağ örgü) model içeri yönde parçanın cidar kalınlığı kadar ötelenmiştir (offset). Ardından Şekil 7(b)'de görüldüğü gibi iç kısımdaki bu poligon model bıçakmışçasına kullanılarak iç boşaltma yapılmıştır. Son olarak ise katı modelleme unsurları ve yüzey modelleme ile elde edilen kısımlar birbiriyle birleştirilmiş ve parçanın nihai BDT modeli elde edilmiştir (bkz. Şekil 7(c)).



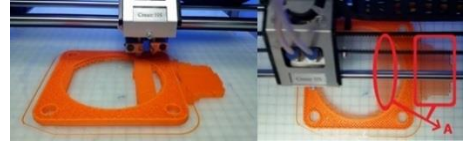
Şekil 7: (a): Yüzey modelleme ile oluşturulmuş kısımın boşaltılması. (b): Boşaltma sonrası yüzey modelleme kısmının geometrik formu. (c): Katı ve yüzey modelleme kısımları birleştirilmiş parçanın nihai BDT modeli. (d): Tamamlanmış BDT modeli ile mesh arasındaki sapmaların görünümü.

Tasarlanan BDT modeli üzerinde tersine mühendislik uygulamasının amacına göre değişiklikler yapmak tarama verisi üzerinden oluşturulmuş parametrik model ile mümkün hale gelmiştir. Örneğin piyasaya satış yapan bir kalıp firması ömrünü doldurmuş ürünü üzerinde tersine mühendislik uygulayarak analiz yapabilir ve daha uzun ömürlü kalıplar geliştirebilir ya da kendi imalat imkân ve süreçlerine göre tasarımda değişikliklere gidebilir.

BDT modelinin oluşturulmasının ardından turboşarj dirseği tasarımını gerçek anlamda 3 boyutlu görebilmek amacıyla ve yukarıda belirtilen tasarım revizyonu veya kalıp, model tasarımlarında prototip için kullanılabilirliği anlamak amacıyla Leapfrog Creatr HS yazıcıda bire bir ebatla üç boyutlu olarak bastırılmıştır. Yazıcı özellikleri Şekil 8’de görülmektedir. Yazım işleminde Simplfy 3D yazılım kullanılmıştır. Basım işleminde PLA hammadde kullanılmıştır. Günümüzde üç boyutlu yazıcılar tasarım ve çeşidine göre çok geniş bir yelpazedeki malzemelerle çalışabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan yazıcı aynı zamanda ABS, Nylon, PVA gibi malzemeleri de desteklemektedir [16]. Şekil 9’da görülen baskı sırasında, üç boyutlu yazıcı parçayı tabanından başlayarak en üst noktasına kadar sıvı haldeki termoplastik malzemeyle bir nozul vasıtasıyla katman katman örmektedir. Parçanın açılı yüzeylerinde zemine göre 45°’yi geçen kısımlarda sarkmaları önlemek amacıyla destek malzemesi kullanılmıştır. Oluşturulan destekler baskı işlemi sonrasında kolayca ana parçadan ayrılmıştır. Üç boyutlu yazıcının kendi yazılımı vasıtasıyla, basımı yapılan parça için ne kadar boşluklu yapıda olacağı gibi kriterler kontrol edilebilmektedir. Yazılım üzerinden benzer ayarlar vasıtasıyla, baskı süresi gibi kriterler denetlenebilmektedir. Turboşarj dirseğinin bire bir ölçüde basılması toplamda otuz yedi saat sürmüştür. Şekil 4’te baskıdan sonra elde edilen hali görülmektedir. Tersine mühendislik yönteminin tüm bu uygulamalardan da görülebileceği gibi diğer tüm kullanım alanlarının yanı sıra, üç boyutlu baskı teknolojisi ile birlikte kullanılarak; hızlı prototipleme, var olan bir ürünün kalıbının tasarımı için model oluşturulması veya doğrudan üretim gibi alanlarda gelecekte daha da yaygın olarak kullanılabileceğini öngörmek mümkündür.

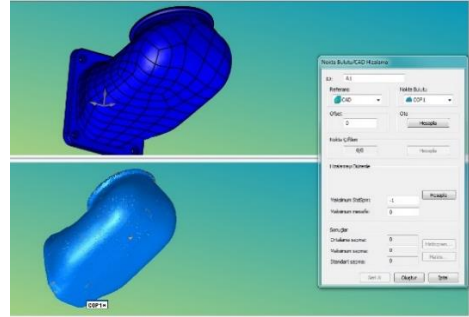
Ekstrüder	Çift (275 ° C)
Tabla / Ortam tipi	Isıtmalı Cam (90° C)
Azami Yazdırma Ölçüleri (EBY)	29 x 27 x 18 cm
Hız	30 - 300 mm/s
Katman kalınlığı	20 – 350 mikron
Hassasiyet	XY:16.9 ; Z: 20 mikron
Yazılım	Simplfy 3D , Materialise
Bağlantı	Seri, Stand-alone
Gövde	Alüminyum profil/ Kompozit
Ağırlık	40 kg
Gövde Ölçüleri	60 x 50 x 50 cm
Filament Tipi	Açık sistem: ABS,PLA, PVA, HIPS, Nylon, Woodplas, Flex.....

Şekil 8: Leapfrog Creatr HS 3B yazıcı özellikleri [19].



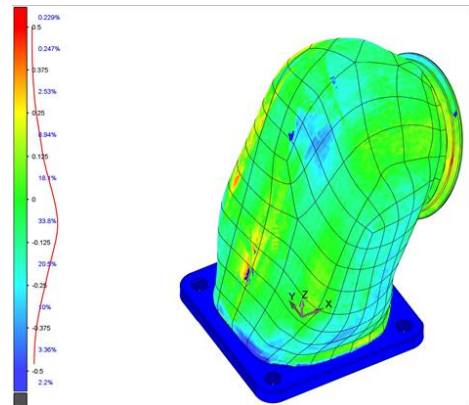
Şekil 9: Üç boyutlu baskı işlemi ve sonradan kırılabilen (A) destek kısımları.

Literatürde yapılan çalışmalarda tersine mühendislik ile temel geometrik formlarda tasarlanıp imal edilen parçaların yeterli hassasiyet ile 3 boyutlu çıktılarının alındığı görülmektedir [6]. Ancak bu çalışmada gerçekleştirilen parçadaki gibi nispeten karmaşık ve serbest formlara sahip bir parçanın çıktısının BDT ile ölçü kıyaslamasına rastlanmamıştır. Bu sebeple elde edilen 3 boyutlu çıktının serbest forma sahip kısımları HP-L-8.9 lazer tarayıcı ile Şekil 10’da görüldüğü gibi taranmış ve hizalama işlemi gerçekleştirilerek tersine mühendislik ile oluşturulmuş BDT model ile PC-Dmis programı üzerinde karşılaştırılmıştır.



Şekil 10: Hizalama işlemi sırasında görünüm.

Sonrasında karşılaştırılan nokta bulutu halindeki tarama verisi noktalarının BDT modele göre sapmaları (“Yüzey Nokta Renk Eşleme” komutu kullanımı ile) tespit edilmiş ve sapmaların dağılımı Şekil 11’de gösterilmiştir. Noktaların %54.3’nün  $\pm 0.125$  mm sapma değerinden küçük değerlerde olduğu, %83.74’nün ise  $\pm 0.25$  mm sapma değerinden küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 11’de görülen koyu mavi ve kırmızı renklerdeki bölgelerin tarama işlemi sırasında yetersiz nokta elde edilmesi ya da saçılmalardan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu kusurları bertaraf etmek için tarama verisinde düzeltmeler ve eksik veri kalan kısımlarda tekrar tarama yapılması mümkündür ancak yapılan tarama yazıcının alınan parçanın kalitesini tahlil etmek için yeterli görülmüştür. Kontrol işlemi ile serbest formlara sahip parçaların 3 boyutlu yazıcı ile üretiminde güvenilir sonuçlar verebileceği görülmüştür.



Şekil 11: Noktaların BDT modele göre sapma değerlerinin yüzdesel dağılımı ve renklendirme ile tespiti.

## 5 Sonuçlar

Literatürde yapılan çalışmalarda 3 boyutlu yazıcıların tersine mühendislik sürecine entegre edilebileceği görülmüş fakat farklı olarak serbest yüzey formlarına sahip bir makine parçası için de bu tespitin geçerli olduğu doğrulanmıştır. Yapılan uygulama ile oluşturulan iş akışının işlevsel olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak aşağıdaki değerlendirmeleri yapmak mümkündür.

- ✓ Literatürde yapılan çalışmaların nokta bulutlarının düzenlenmesi ile bunların üzerinden parametrik modelin gerçekleştirilmesinin yanı sıra, nokta bulutundan oluşturulan poligon modellerin üzerinde de (kesme, ekstrüde etme, öteleme vb.) düzenlemeler yapılarak parametrik model oluşturulmasında yardımcı olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır,
- ✓ Uygulama sonucunda 3 boyutlu yazıcılardan alınan ürünlerin üretim, kalite kontrol gibi faaliyetler öncesi tasarımın doğrulanmasında kullanılabilirliği görülmüştür. 3 boyutlu yazıcıların tersine mühendislik sürecinin standart bir parçası olabileceği görülmüştür,
- ✓ Tersine mühendislik yazılımlarının gelişimi ile günümüzde mekanik parçaların tersine mühendislik ile modellenmesinde yüzey ve katı modellemeyi bir arada kullanmak mümkündür,
- ✓ Oluşturulan akışa göre, mühendislik açısından düşünüldüğünde, şekilsel tasarım dışında fonksiyonellik açısından amaca, parça yapısına, parçanın konstrüksiyondaki konum ve durumuna göre tersine mühendislik ekipmanları dışında da farklı ölçüm ve analizler yapmak gerekebilmektedir. Bu durum ileriki çalışmalarda ele alınacaktır.

## 6 Kaynaklar

- [1] Wang W. *Reverse Engineering Technology of Reinvention*. NW, Washington, USA, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [2] Várady T, Martin RR, Cox J. "Reverse engineering of geometric models-an introduction". *Computer Aided Design*, 29(4), 255-268, 1997.
- [3] Lee KH, Woo H. "Use of reverse engineering method for rapid product development". *Computers & Industrial Engineering*, 35(1-2), 21-24, 1998.
- [4] Yang Z, Chen Y. "A reverse engineering method based on haptic volume removing". *Computer Aided Design*, 37(1), 45-54, 2005.
- [5] Mian SH, Mannan AM, Al-Ahmari AM. "Multi-Sensor integrated system for reverse engineering". *Procedia Engineering*, 64, 518-527, 2013.
- [6] Dúbravčík M, Kender S. "Application of reverse engineering techniques in mechanics system services". *Procedia Engineering*, 48, 96-104, 2012.
- [7] Sansoni G, Docchio F. "Three-Dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 20(5), 359-367, 2004.
- [8] Xu L, Lin M, Li J, Wang Z, Chirende B. "Three-Dimensional geometrical modelling of wild boar head by reverse engineering technology". *Journal of Bionic Engineering*, 5(1), 85-90, 2008.
- [9] Hexagon Metrology. "Lazer Tarayıcılar" [http://www.hexagonmetrology.com.tr/Lazer-Tarayicilar\\_107.htm#V2VI6buLRdg](http://www.hexagonmetrology.com.tr/Lazer-Tarayicilar_107.htm#V2VI6buLRdg) (30.04.2016).
- [10] Faro. "Metroloji". <http://www.faro.com/tr-tr/urunler/metroloji> (30.04.2016).
- [11] Mega Danışmanlık Koordinat Ölçüm Makineleri. "Kontrol Ölçme Makineleri". [http://www.megadanismanlik.com.tr/koordinat\\_olcme\\_makineleri-88-hizmet.htm](http://www.megadanismanlik.com.tr/koordinat_olcme_makineleri-88-hizmet.htm) (30.04.2016).
- [12] FabCentra "How to Scan Objects into 3D Using Structured Light?". [http://fab.cba.mit.edu/content/processes/structured\\_light/](http://fab.cba.mit.edu/content/processes/structured_light/) (30.04.2016).
- [13] Autodesk Alias. "Introduction to Reverse Engineering". <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Alias-Tutorials-Legacy/files/GUID-B5B54540-FDF7-4339-8A45-02FC830DF587-htm.html> (30.04.2016).
- [14] 3D Systems Corporation. "Geomagic Design X". <http://www.rapidform.com/products/xor/overview/> (30.04.2016).
- [15] Delcam. "Revere Engineering in PowerSHAPE Pro". <http://www.delcam.com/software/powershape/reverse-engineering/> (30.04.2016).
- [16] Leapfrog 3D Printers. "Creatr HS 3D Printer". <http://www.lpfrg.com/en/creatr-hs> (30.04.2016).
- [17] Ören S, Yasa E, Uğur E, Poyraz Ö, Akbulut G, Pilatin S. "Havacılık sektöründe optik ölçüm yöntemlerinin yeri ve karşılaştırmalı değerlendirilmesi üzerine bir çalışma". *Mühendis ve Makine*, 55(654), 35-60, 2014.
- [18] Hexagon, "HP-L.8.9 Lazer tarayıcı" [http://www.hexagonmetrology.com.tr/HP-L-89-LazerTarayici\\_1669.htm#VzWQkYSLRqM](http://www.hexagonmetrology.com.tr/HP-L-89-LazerTarayici_1669.htm#VzWQkYSLRqM) (13.05.2016).
- [19] Voksel, "Karşılaştırma Tablosu". <http://www.voksel.com.tr/markalar/karsilastirma-tablosu/75> (05.12.2016).