

# Tersine Mühendislik Süreci ve Uygulamaları

E. Salih BOZKURT

Defne Mühendislik Ltd. Şti.

## TERSİNE MÜHENDİSLİK SÜRECİ

Otomotiv sanayisi son yıllarda bilgisayar teknolojisinde yaşanan hızlı gelişmeye dayalı olarak büyük bir değişim içerisinde. Lisans altında üretimin yanı sıra araç tasarımı konusunda da otomotiv sanayisinde değişim sürmektedir. Araç tasarımı aşamasında face-lift olarak adlandırılan mevcut araçların modifikasyonları ve sıfırdan araç geliştirme konusunda geriye dönük mühendislik (Reverse Engineering) çalışmaları önemli bir yer tutmaktadır. Gerek araç iç donanımı, gerekse dış görünüşü üzerinde yapılacak olan geliştirmelerde tersine mühendislik çalışmaları ülkemizde ve dünyada artmaktadır.

Tersine mühendislik süreci, bir objenin

ölçümü ile başlar ve ardından üç boyutlu CAD model oluşturulması ile devam eder, prototip ya da ürün imalatı ile son bulur. Günümüzde uygulanan standart üretim metotları, ürünün bilgisayar ortamında CAD tasarımının yapılması ile başlayıp uygun CAM metotları ile üretim aşamasına geçilen süreçleri kapsar. Tersine mühendislikte ise mamul parçadan hareketle imalat sürecindeki aşamalar geriye doğru çözümlenir (Şekil 1).

Tersine mühendisliğe (RE) yaygın olarak aşağıdaki sebeplerden ötürü ihtiyaç duyulmaktadır:

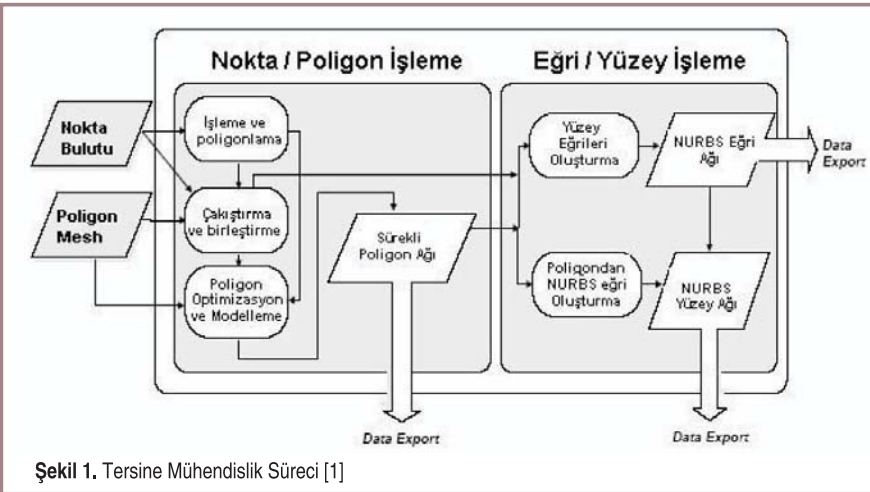
- Üreticinin bir parçayı uzun zamandır üretmemesi ve tekrar üretmek istemesi,
- Orjinal dizaynın yetersiz dökümantasyona sahip olması,
- Bir ürünün orjinal üreticisinin artık

bulunmaması fakat müşterilerin bu ürüne ihtiyacının olması,

- Ürünün orijinal dökümantasyonunun kaybolması veya hiç varolmamış olması,
- Ürünün bazı kötü özelliklerinin yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulması,
- Ürünün uzun süreli kullanımına dayanarak ürüne ait iyi özelliklerin güçlendirilmesi,
- Rakip ürünün iyi ve kötü özelliklerinin analiz edilmesi,
- Ürünün performansını ve özelliklerini geliştirmede sonuca götürecek yeni yolların keşfedilmesi,
- Rakip ürünlerin anlaşılması ve daha iyi ürünlerin geliştirilmesinde rekabete dayalı kıyaslama metotlarının elde edilmesi,
- Orijinal CAD modelinin değişikliklere ya da güncel üretim yöntemleri için yeterli olmaması,
- Orijinal üretici firmanın ek/yedek parçalar sağlamada yetersiz ya da isteksiz olması,
- Orijinal üretici firmanın parça sağlamada aşırı ücret talep etmesi,
- Modası geçmiş parçaların ya da eski üretim işlemlerinin bugünkü ve daha ucuz teknolojilerle güncellenmesidir.

### 3D Sayısallaştırma / Optik Tarama

Ürünler gelişen teknolojinin yardımı ile 10 yıl öncesine göre daha formlu hatlara sahip olarak tasarlanmaktadır. Özellikle otomotiv sanayiinde diş



Şekil 1. Tersine Mühendislik Süreci [1]

görünüşten iç aksamlara ve detaylara kadar tüm parçalar CAD ortamında yüzey modelleme olarak tanımlanan formlu görünüşlere sahip olmaktadır. Günümüzde optik ölçüm teknolojisindeki gelişmeler ile bu formlar kolaylıkla ölçümlendirilebilmektedir.

3D sayısallaştırma/tarama sistemleri iki ana gruba ayrılır: dokunmalı ve dokunmasız sistemler. Dokunmalı ya da diğer adıyla probu sistemler, mekanik kollu sistemler ve CMM'dir. Birkaç eksenli mekanik kolun ucuna takılmış bir ölçüm probu sayesinde, koordinatları istenen noktaya dokundurulan prob ile noktanın koordinatları hassas biçimde ölçülür. Bu sistemlerle yüzey bilgisi değil istenen belirli sayıda noktanın koordinatları elde edilebilmektedir.

Dokunmasız optik sistemlerle serbest formlu yüzey bilgisi elde edilmesi hem ürün geliştirme, tersine mühendislik ve kalite kontrol işlemleri üzerine uzmanlaşmış mühendislik ofisleri, hem de büyük endüstri kuruluşlarının tasarım ve ürün geliştirme, kalite kontrol, kalıphane vs. gibi departmanları için önem arz etmektedir. Bu sistemlerle tüm yüzey formu çok yüksek hassasiyetle elde edilmekte ve CAD modelin oluşturulması, hızlı prototipleme ve CNC'de işleme işlemlerine hazır hâle gelmektedir.

Dokunmasız sistemlerin çok çeşitli tipleri ve her birinin farklı kullanım alanları olmakla birlikte, lazer çizgili sistemler ve yapılı ışık desenli (ızgara projeksiyonu, fringe) sistemler ya da topogrametrik sistemler, kullanımı diğerlerine göre daha yaygın olanlarıdır.

Dokunmasız optik tarama sistemlerinden lazer çizgili sistemler, cismin üzerine bir lazer kesiti düşürülmesi ve bu kesitin cismin üzerinde hareket ettirilmesi prensibi ile çalışırlar. Ölçüm metodu lazer kesitinin

cisim üzerinde deformasyona uğraması ve bu deformasyon bilgisinin CCD dijital kamera vasıtası ile alınması şeklindedir. Portatif elle taşınan modeller olduğu gibi mekanik kol ucuna bağlananları da vardır. Ayrıca robot koluna bağlanarak ölçüm otomatik hâle de getirilebilir.

Dokunmasız optik tarama sistemlerinden yapılı ışık desenli 3D optik tarama sistemlerinin değişik dizayn tipleri mevcuttur. Tek kameralı, çift kameralı, asimetrik çift kameralı sistemler gibi. Tüm bu sistemlerde güçlü bir halojen ışık kaynağı ile cismin üzerine farklı dokusal özellikleri olan fringe'ler düşürülür. Cismin yüzeyi üzerinde bu kodlanmış yapılı ışıklar, cismin şeklinin karakteristik özelliklerine göre deformasyona uğrar. Projeksiyon sistemi ile özel bir açı yapacak şekilde yönlendirilmiş yüksek çözünürlükteki bir kamera sistemi ile bu deformasyon bilgileri alınır ve nokta bulutu oluşturulur. Bu sistemler sayesinde çok sayıda noktanın koordinatı çok kısa zamanda (~ 1sn) ölçülür. Böylelikle cismin yüzey formu bilgisini içeren nokta bulutu oluşturulmuş olur.

Tek kameralı sistemlerde bir projeksiyon cihazı ve 1 CCD dijital kamera aralarında belli bir açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu açuya üçgenleme açısı denir. Bu açı sayesinde noktaların koordinatları trigonometrik hesaplarla elde edilir.

Çift kameralı sistemlerde ortada bulunan projeksiyon cihazı ile eşit veya farklı açı yapacak şekilde konumlandırılmış 2 CCD kamera bulunmaktadır. İki kameranın da ortak olarak gördüğü bölge esas ölçüm bölgesidir.

### Optik Üçgenleme

3 boyutlu topogrametrik ölçüm 3. boyutta görüntü işlemede fotogrametri ve stereometri kadar iyi bir yöntemdir. Tüm teknikler optik üçgenleme (optical

triangulation) prensibini temel alır. Kelime anlamı belli sayıda noktanın konumunu kesin olarak tespit edebilmek için, bu noktaları tepe olarak kabul ederek bir alanı üçgenlere bölme işi olan "triangulation" tüm 3 boyutlu ölçme/tarama tekniklerinin kullandığı yöntemdir. Çok çeşitli uygulama alanları olan üçgenleme prensibi haritacılıktan GPS ile konum belirlemeye kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu prensiple, matematiksel olarak uzayda kesişen doğruların yardımı ile noktanın bulunduğu yer hassas olarak elde edilir.

- Aktif Metotlar
  - o Optik Üçgenleme (Optical Triangulation) (1D)
  - o Işık kesiti (light section) teknikleri (2D)
  - o Izgara Projeksiyonu (Fringe Projection) (3D)
- Pasif Metotlar
  - o Stereometri
  - o Fotogrametri

### Sayısallaştırma Cihazlarının Kullanım Alanları

#### Sanayileştirme Cihazları;

- Çamur, kil, köpük gibi malzemelerden el ile yapılmış endüstriyel tasarım modellerinin sayısallaştırılmasında,
- Rakip ürün incelemelerinde,
- Sanat eserlerinin restorasyonunda,
- Diş, protez ve benzeri medikal uygulamaların sayısallaştırılarak üretilmesinde,
- CAD datası mevcut olmayan ürün, kalıp, aparat, fiktür gibi parçaların CAD datasını elde etmek için sayısallaştırılmasında,
- CMM tezgahında ölçülemeyecek kadar büyük olan ürünlerin ölçümlerinde,
- Ürünün uygulama yerinde yapılacak ölçümlerde,
- Kalıp ve aparatların kalite kontrolünde,
- Yüzey formlarının kontrolünde,
- Üretim esnasında veya sonradan

oluşan çökme, eğilme gibi fiziksel hataların tespitinde kullanılmaktadır.

## CAD MODELLEME

Sıfırdan modellemeden farklı olarak STL datadan modelleme yapmak hem süre hem de çaba bakımından daha zor bir süreçtir. Müşteri tarafından belirlenen toleranslar ve değişiklikler bu süreci daha da zorlu hâle getirmektedir. Ayrıca bu projede olduğu gibi yüzey kalitesinin yüksek olmasını gerektiren durumlar daha fazla sabır, dikkat, deneyim ve bilgi birikimi gerektirmektedir.

CAD modelleme programları genellikle tersine mühendislik modüllerini standart olarak içermemektedir. Bu modüller ilave olarak temin edilebilmektedir. Rapidform, CATIA ve Tebis yazılımlarının modülleri üzerinde bir miktar tecrübe edinilmiştir. Her CAD programı kendine özgü yöntemler içermekle birlikte; genel olarak kullanılan yöntem Şekil 1'de verilen şematik yaklaşım ile tamamlanabilmektedir.

STL üzerinden Section Curve, Feature Curve, 3D Curve gibi eğriler ile ana Primitive ya da Freeform yüzeyler doğrudan elde edilir. Bu eğri ve yüzeyler modellemede doğrudan kullanılabilirliği gibi oluşturulacak yeni eğri ve yüzeylere referans görevi de yapabilirler. Trim hatlarını ve sınırları

belirlemek için de gene programın modülündeki araçlardan faydalanılır. Alınan eğri ve yüzeyler modelin formunu, trim hatlarını ve çeşitli sınırları belirlemede referans olarak kullanılır.

STL'den modelleme projelerinde en çok vakit alan ve en çok uğraşılacak yüzeyin ölçümlendirmeye yakın; ama belli bir matematik formülasyona yaklaştırılması kısmıdır. Oluşturulan bu yüzeylerin hem STL ölçüm datasına toleranslar dahilinde oturması (ölçü kaçıklığının düşük olması) hem de yüzeyin ve yüzey geçişlerinin çok iyi olması bu süreci zorlaştıran en büyük etmenddir. Doğru ve kabul edilebilir bir sonuç almak deneme-yanılma ile mümkündür. Dolayısıyla farklı yüzey komutlarını, farklı parametre değerleri girerek defalarca denemek gerekebilir. İstenilen sonuçlar alındığında gerekli yüzey operasyonları (split, trim, join vs. gibi) vasıtası ile yüzey modellemeye son şekli verilmeye çalışılır. Oluşturulan yüzey modeli katı hâle getirilir. Bu aşamadan sonra artık fiziksel modele ait diğer özellikler (Dress-up features) eklenip model son haline getirilir [Ref 1-2-3].

## ÖRNEK PROJELER

### Arazi Aracı Tavan Çalışması

Yukarıda bahsedilen RE adımları ile gerçekleştirilen bu projede 4x4 bir arazi aracında uygulanan sun-roof

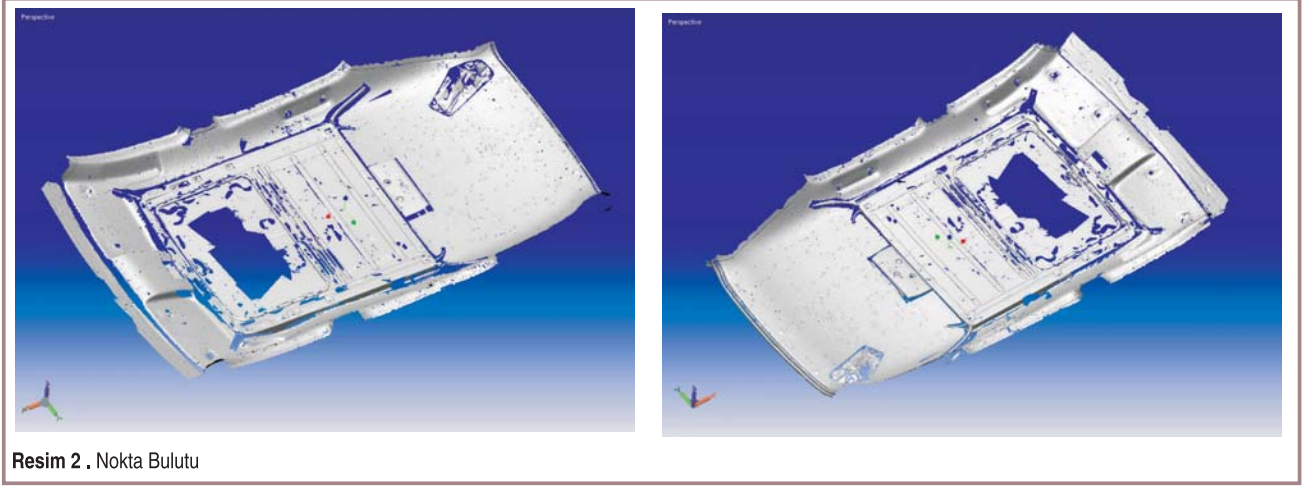
modifikasyonunun sonucunda tavan kaplamasının yeniden tasarlanması prototip üretiminin gerçekleştirilmesi ve müşterinin piyasaya bir an önce ürününü arz edebilmesi başarıyla sağlanmıştır.

Tavan gibi büyük ve esnek parçaların ölçümlendirilmesinde ürünün gerçek boyutlarını ve formunu tam yakalayabilmek için ürün fikstür üzerine yerleştirmek gerekmektedir. Bu projede fikstür olarak aracın kendisi kullanılarak oluşabilecek hatalar önlenmiş son ürünün kullanılacağı yer referans alındığından herhangi bir montaj hatasına yol açılmamıştır.

2 aşamalı olarak gerçekleştirilecek olan ölçümlendirme işleminde fotogrametri sistemi ve optik tarama sistemleri beraber kullanılmıştır. Öncelikle fotogrametri sisteminin yardımı ile referanslar alınmıştır. Referans noktalarının oluşturulmasını müteakip topogrometrik ölçüm için Breuckmann firmasının opto-TOP SE sistemi ile nokta bulutları oluşturulmuştur. Bu işlem için araç içinde hareket edebilen özel bir aparat kullanılmış, bu aparatın yardımı ile tavanın taranabilmesi çok daha hızlı ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. Resim 1 Optik tarama olarak bilinen topogrometrik ölçümlendirme sonucunda nokta bulutu ve poligon mesh data (STL) elde edilmektedir. Fotogrametri



Resim 1. Ölçümlendirme



Resim 2 . Nokta Bulutu

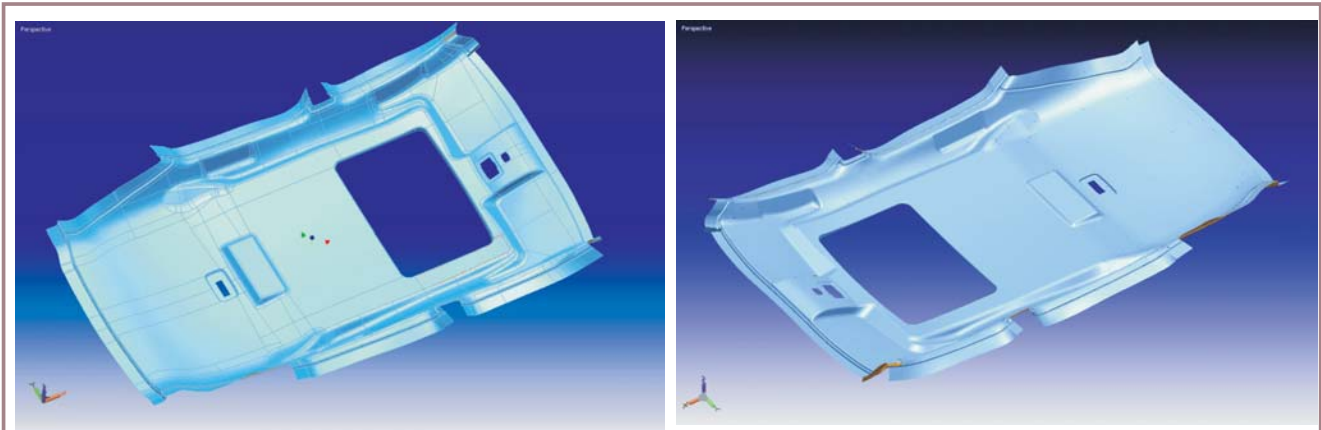
sisteminin yardımı ile ölçümün toplam hassasiyeti 0.06 mm'den daha az olmuştur.

Ölçümlendirme ile mevcut tavanın

bütün yüzey form ile kenar (trim) hatları detaylı olarak elde edilmiştir. Sun roof sisteminin; tavan ile aracın diğer bölümleri ile referansı belirlenerek yeni tasarımı yapılacak

tavan için gerekli olan tüm veriler sağlanmıştır (Resim 2).

CAD tasarımı öncelikle mevcut tavan formunun korunması aracın iç



Resim 3. CAD Model



Resim 4. Kalıp



Resim 5. Sonuç Ürün

tasarımında ciddi değişiklik olmadan sun roof sisteminin aksamlarının tavan formuna katılması sağlanmıştır. Sun roof olan ve olmayan araçlar arasındaki tavan farkının sadece sun roofun kullanıcı ara yüzündeki farklar olarak hissettirecek tasarım hedef alınmıştır.

Tasarım sonucunu seri üretime geçmeden uygulamada görmek; gerek üretim aşamasında gerekse montajda oluşabilecek problemleri, prototip üzerinde görmek amacıyla prototip kalıp ve deneme üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu proje toplam olarak 12 iş gününde tamamlanmış ve ilk denemede yüzde

95 oranında başarı sağlanmıştır. İkinci bir tasarım ve prototip yapımına gerek duymadan, kalıp üzerinde yapılan küçük düzeltmeler ile seri üretime geçilmiştir.

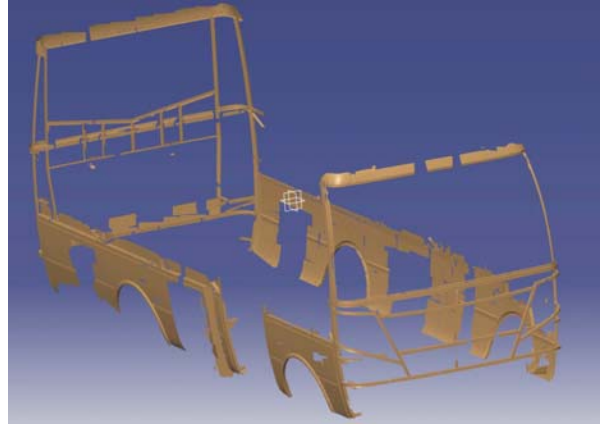
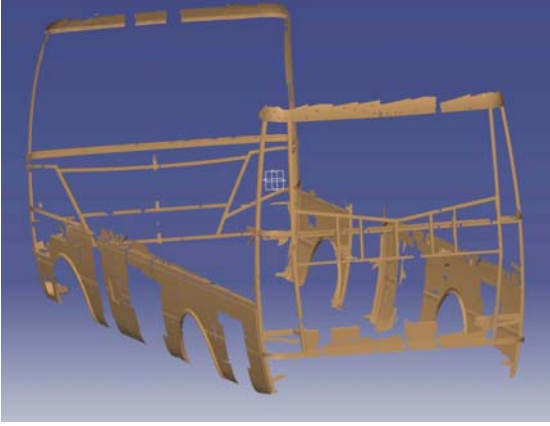
#### Otobüs Karkas ve Etek projesi

Yeni araç tasarımında, karkas yapının geliştirilmesi ve buna bağlı olarak yan eteklerin CAD modelinin oluşturulması: Bu projede amaç ön tasarımı yapılmış olan karkas ve ana yapının gerçek prototipe uygulanması sonucu oluşan modifikasyonların seri imalata yansıtılabilmesi için 3 boyutlu CAD datanın prototipe uygun olarak oluşturulabilmesidir.

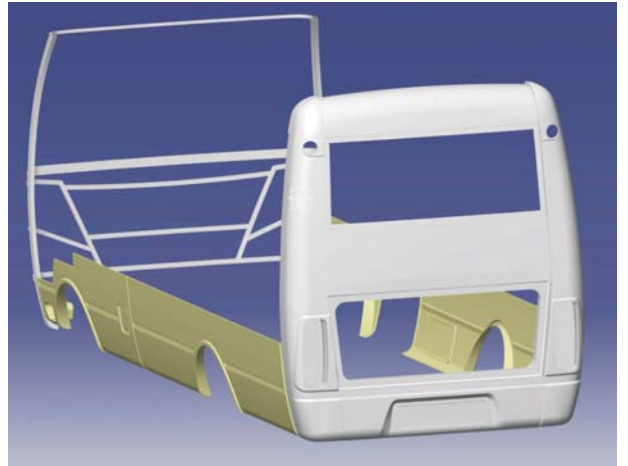
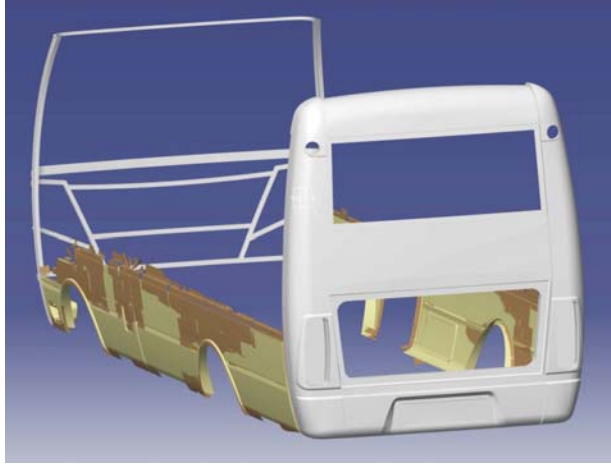
Yeni bir tasarım olan araç konsept

tasarımdan sonra prototip üretimi başlamıştır. Prototip üretiminde karkas yapı konseptte uygun olarak üretilmiştir. Prototip üzerinde aracın diğer parçaları ve kısımları ile uyumluluğunun sağlanması ve iyileştirmelerin uygulanması sonucunda konseptten farklılıklar oluşmuştur. Oluşan farklılıklar ve simetrikliğin tam sağlanabilmesi için prototip ürün optik sistem ile ölçümlendirilerek hem konsept ile karşılaştırılmış hem de yeni CAD data oluşturulmuştur. Bu Cad data seri üretime esas teşkil edecek referans olarak alınmıştır.

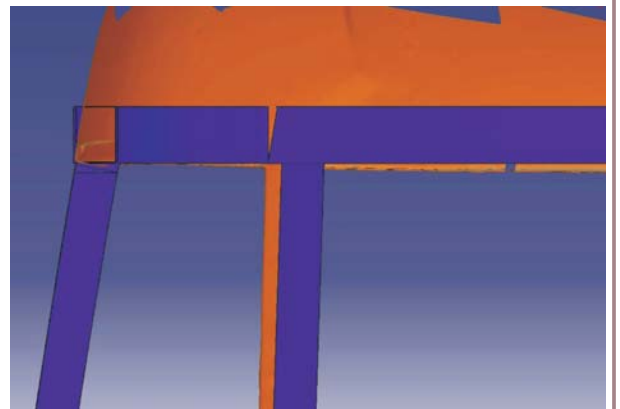
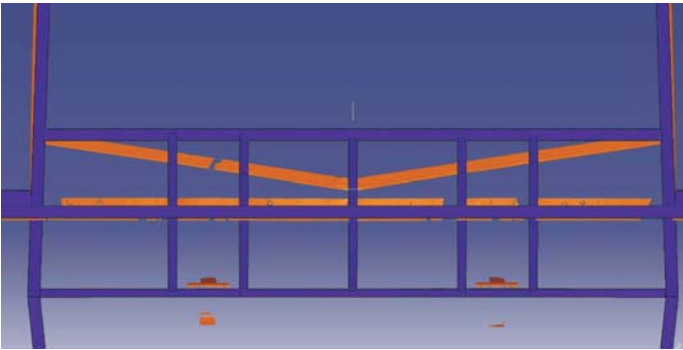
Sonuçta ürün mükemmelliğini sağlayan teorik ve pratik uygulamanın birleşmesi sağlanmıştır.



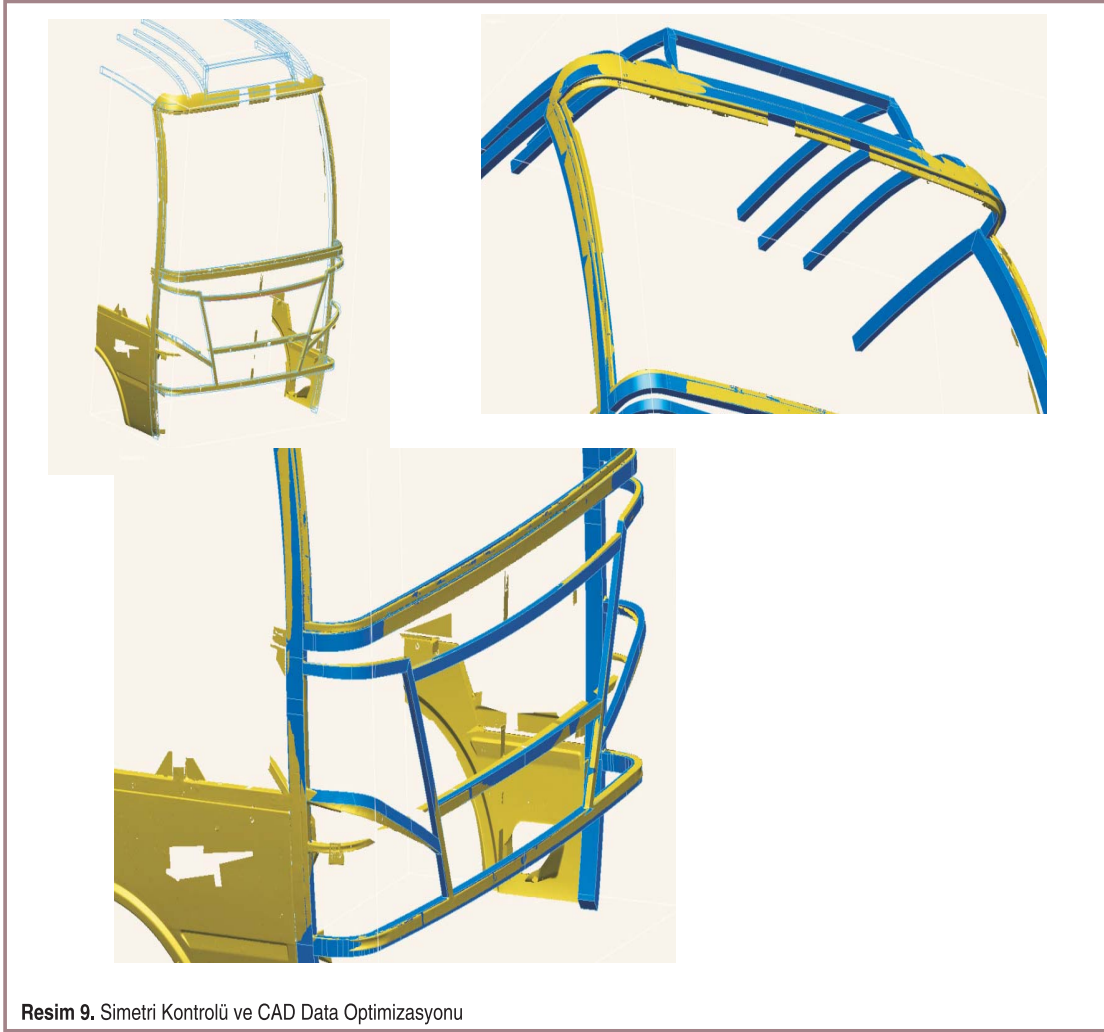
Resim 6. Karkas ve Eteklerin Ölçüm Sonucu



Resim 7. CAD Data Oluşturulması



Resim 8. Ölçüm ve CAD Data Modifişyonları



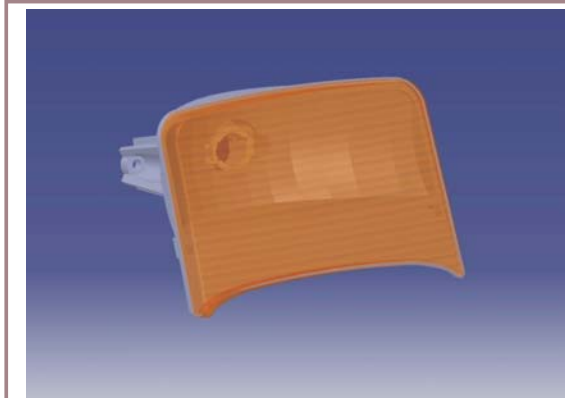
**Resim 9.** Simetri Kontrolü ve CAD Data Optimizasyonu

#### **Tersine Mühendislik Uygulamaları :**

Araç yedek parça üretimi amacıyla farların orijinal numunedan faydalanılarak CAD datasının oluşturulması: Araç üzerindeki parçalar özellikle farlar 6 aylık patent korumasından sonra yan sanayi tarafından üretilerek kullanıcılara sunulabilmektedir. Far üretici müşterimize yapılan örnek bir çalışma Resim 10'da gösterilmektedir.

Bir otobüsün ön tamponunun çamur modelden seri üretime geçirilmesi amacıyla yapılan bir proje: Bu projede otobüsün ön çamurluğu face lift olarak adlandırılan

yöntemle yenilenmiştir. Kabul edilen yeni tasarım, bir tasarımcının çamurdan modeli el oluşması sonucu ortaya çıkmıştır. Bu model optik yöntem ile ölçümlendirilerek CAD data haline



**Resim 10.** Far CAD Modelinin Uygulanması

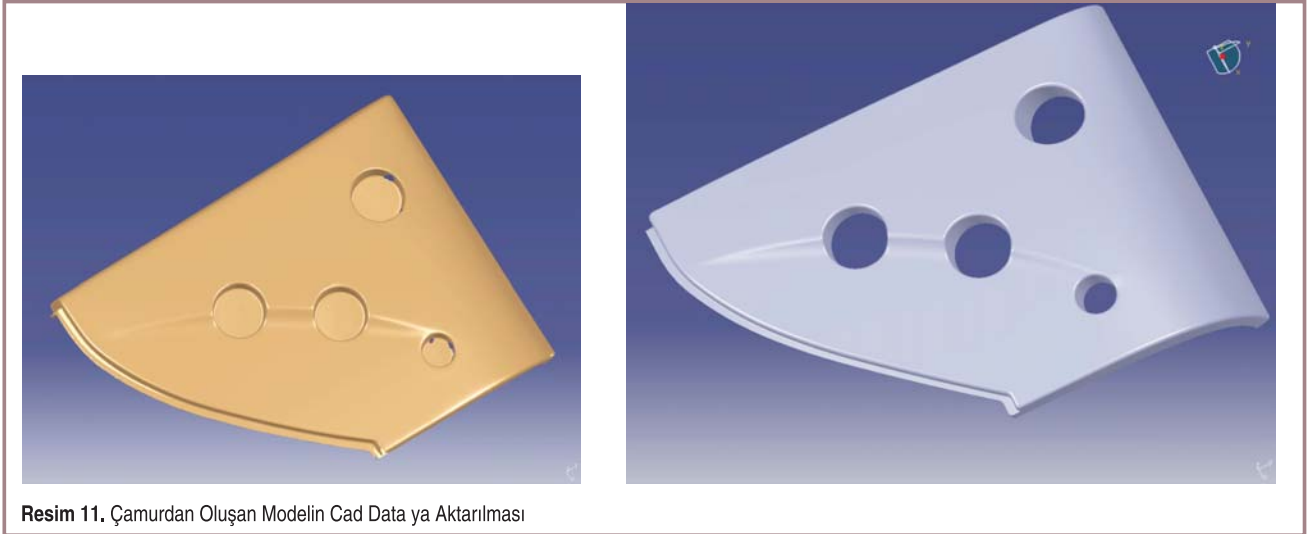
getirilmiş kalıplı üretime hazır olarak müşterimize teslim edilmiştir.

#### **Eski araba parçasının yeniden canlanması:**

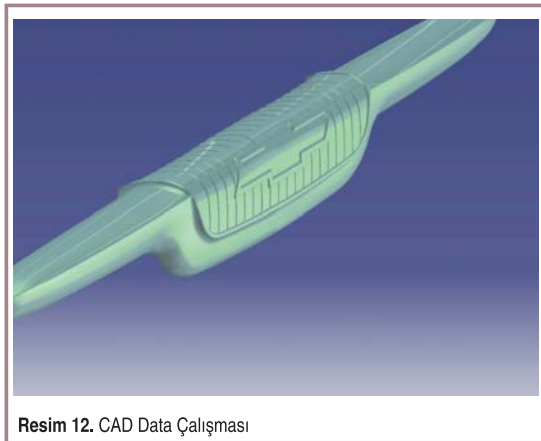
1956 model Chevrolet aracın ön tarafında yer alan aksam parçasının oluşturulması: 1956 model araçtan alınan numune eskimiş ve hatta hasarlı bir hâlde müşteri tarafından getirilmiştir. Bu müşteri eski araçları çalışır hâle getirip koleksiyonculara veya meraklılarına yeni fabrikadan çıkmış gibi teslim etmektedir. Bu amaç ile gelen parçanın CAD datası oluşturulmuştur.

#### **Kalıp yenileme çalışması :**

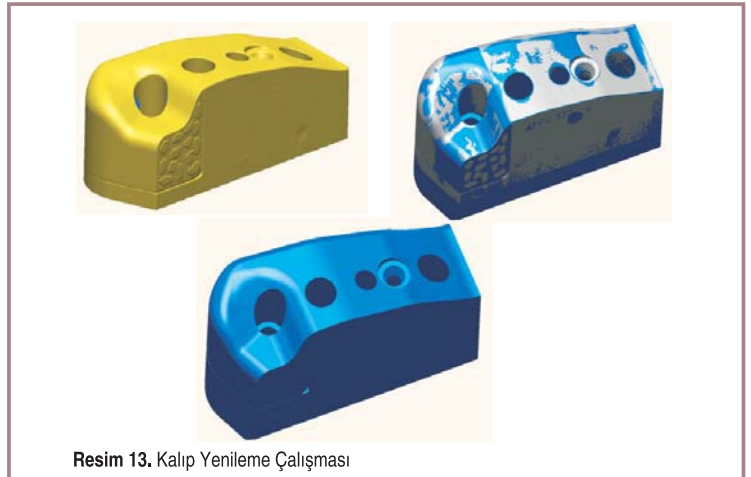
Tersine mühendislik kalıpların yenilenmesi yedeklenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Sac kalıpları



Resim 11. Çamurdan Oluşan Modelin Cad Data ya Aktarılması



Resim 12. CAD Data Çalışması



Resim 13. Kalıp Yenileme Çalışması

gerek zaman içerisinde gerekse bazı hatalardan dolayı hasarlanmakta veya aşınmaktadır. Bu hasarlanmada kalıplar gerekli kaliteyi sağlayamayacak hâle geldiklerinde orijinal hâlde kalıbın datasına ihtiyaç duyulmaktadır. Sac kalıpların 3D dataları tasarlandığı hali ile üretimdeki onay alınmış geometrik halleri arasında farklar olmaktadır. Bunun birçok farklı sebebi olmaktadır. Çalışan kalıpların ölçümleri alınarak bir hasar anında çalıştıkları haline geri üretilebilmeleri için CAD dataları oluşturulmaktadır. Bu da yeniden alıştırma ve onay sürecini geçerek üretimin aksamasına engel olan bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

## KAYNAKÇA

1. Çakır A. 2005. Optik Taramanın Genel Prensibi, Defne Mühendislik [http://www.defnee.com/3D\\_Optik\\_Taramanın\\_Temel\\_Prensibi.pdf](http://www.defnee.com/3D_Optik_Taramanın_Temel_Prensibi.pdf)
2. Breuckmann GmbH Industrial Image Processing and Automation (Help Documents), Mayıs 2005
3. Rapidform 2004 Tutorials, 2005
4. Grup Otomasyon CATIA eğitim Notları RE modülü,
5. Redoks Mühendislik Bilgisayar Tic. Ltd. Şti TEBİS CAD Eğitimi R23-09-2008
6. Görür B. V., Akdoğan A. N., Yurci M. E. 2003. "Optik Ölçme

Yöntemlerinin Sac ve Plastik Parçaların İmalatındaki Sayısallaştırma, Tersine Mühendislik ve Muayene Prosesleri Yönünden Sağladığı Yararlar", [www.turkcadcam.net](http://www.turkcadcam.net), Aralık.

7. Dereli T., Baykasoğlu A. 2005. "Tersine Mühendislik", [www.turkcadcam.net](http://www.turkcadcam.net), Nisan.
8. [Http://www.geodetic.com/WhatIs.htm](http://www.geodetic.com/WhatIs.htm)
9. [Http://www.optical-metrology-centre.com/tech\\_briefs\\_optical\\_triangulation.htm](http://www.optical-metrology-centre.com/tech_briefs_optical_triangulation.htm)
10. Three-dimensional Shape Measurement Based on Digital Fringe Projection And Phase-shifting Techniques by Hu, Qingying, Ph.D., State University of New York at Stony Brook, 2001, 115 pages; AAT 3044943