

**FARKLI HIZLI PROTOTİPLEME CİHAZLARINDA ÜRETİLEN  
PARÇALARIN ÜRETİM ZAMANI VE MALİYET AÇISINDAN  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**Serhat APAK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2010  
ANKARA**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serhat APAK

**FARKLI HIZLI PROTOTİPLEME CİHAZLARINDA ÜRETİLEN  
PARÇALARIN ÜRETİM ZAMANI VE MALİYET AÇISINDAN  
KARŞILAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Serhat APAK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Şubat 2010**

**ÖZET**

Bu çalışma; hızlı prototipleme cihazlarında üretilmesi planlanan parçalara uygun cihazın tespiti için kullanılan “üretim zamanı ve maliyet” etkilerini karşılaştırmalı olarak incelenmesini kapsamaktadır. Hedeflenen kapsamın çalışma dahilinde olabilmesi için, cihaz seçiminde etkili olan kriterler dikkate alınarak bir model seçilmiştir. Seçilen model farklı Hızlı Prototip Üretimi cihazlarında inşa edilmiş ve inşa aşamasında kullanılan cihazların farklı çalışma tekniklerine sahip olması ile endüstride yaygın kullanılır olmasına dikkat edilmiştir. Bu hızlı prototipleme teknikleri; ısıtarak toz bağlama, yapıştırıcı ile toz bağlama, sıvayarak harç yığma ve tarayarak ışıkla kür teknikleridir. Üretim süreci; inşa öncesi hazırlık işlemleri, inşa aşaması ve inşa sonrası işlemler olmak üzere üç ana bölüme ayrılmıştır. Her bölümde gözlem ve incelemeler yapılarak üretim zamanı ve maliyete etkili olan unsurlar tespit edilerek zaman ölçümleri yapılmıştır. Modellerin üretim sürecinde elde edilen üretim zamanı ve maliyet açısından etkili bulguların karşılaştırmalı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, en kısa üretim zamanı ve maliyet sergileyen teknik yapıştırıcı ile toz bağlama iken en uzun üretim zamanı ve en yüksek maliyeti gösteren tarayarak ışıkla kür tekniği olmuştur. Tekniklerin çalışma prensipleri arasındaki farklılıklar ve bu farkların üretim zamanı ve maliyete etkisi karşılaştırmalı olarak yorumlanarak, üretilebilirlik dışında

**değerlendirme yapıldığında uygun cihaz seçimi için önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışma ile, hızlı prototip üretimi cihazlarında planlanan üretimlerde, uygun cihaz seçimi için verilecek kararın doğruluğunu arttırabilecek veriler endüstrinin bilgisine sunulmuştur.**

**Bilim Kodu : 708.1.140**  
**Anahtar Kelimeler : Hızlı Prototip Üretimi, Üretim Zamanı, Maliyet**  
**Sayfa Adedi : 84**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR**

**A COMPARING OF PARTS PRODUCED AT DIFFERENT RAPID  
PROTOTYPING MACHINES IN TERM OF PRODUCTION TIME AND  
COST**

**(M.Sc. Thesis)**

**Serhat APAK**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**February 2010**

**ABSTRACT**

**This study, rapid prototyping machines for the planned production of the device used to detect the effects of the production time and cost includes a review of the comparative. Intended to be within the scope of the study; the device is effective in the selection criteria, taking into account a model is chosen. Selected models were built in different rapid prototyping manufacturing and construction phases of the device used in the possession of devices with different operating techniques commonly used in industry have been sure. This rapid prototyping techniques; selective laser sintering, glue binding the dust, fused deposition modeling, and stereolioraphy techniques are stockpiling. Production process; preparatory processes prior to construction, construction and construction phase of the process are then divided into three main sections. Observations made in each section and review the time and cost-effective production of the elements were measured to determine the time. Models obtained in the production process in terms of production time and cost effective analysis was carried out comparative findings. As a result, the shortest production time and cost adhesives that exhibit technical longest production time while connecting with dust and the highest costs shows the stereoliography technique has been cured with light. Technical differences between the working principles and production time and cost impact of this difference is being interpreted in**

comparison, produced outside of maintainability evaluation is made recommendations for selection of suitable devices are found. In this study, rapid prototype production devices in the planned production, the decision for selection of suitable devices that may increase the accuracy of the information was presented to industry data.

|                     |                                                            |
|---------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Science Code</b> | <b>: 708.1.140</b>                                         |
| <b>Key Words</b>    | <b>: Rapid Prototype Production, Production Time, Cost</b> |
| <b>Page Number</b>  | <b>: 84</b>                                                |
| <b>Adviser</b>      | <b>: Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR</b>                           |

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli katkılarda bulunan danışmanım Prof. Dr. Kürşad DÜNDAR' a, fikir ve görüşlerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER ve Doç. Dr. İhsan KORKUT' a, çalışma konusundaki engin bilgi ve deneyimlerini paylaşma özverisini gösteren sayın Erkut NEĞİŞ' e, kadim dostum Burhan ÖZUĞUR' a ve hayat boyu yanımda yer alan aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                              | iv    |
| ABSTRACT .....                                                          | vi    |
| TEŞEKKÜR .....                                                          | viii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                       | ix    |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                              | xii   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                                | xiv   |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                | xvi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                           | xviii |
| 1. GİRİŞ .....                                                          | 1     |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                          | 4     |
| 2.1. Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Endüstride Kullanımı .....     | 4     |
| 2.2. Hızlı Prototipleme Teknolojilerinde Üretim Zamanı ve Maliyet ..... | 7     |
| 2.3. Literatür Değerlendirmesi .....                                    | 8     |
| 3. HIZLI PROTOTİP ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ .....                           | 10    |
| 3.1. Hızlı Prototip Üretimi .....                                       | 10    |
| 3.2. HPÜ Teknolojileri .....                                            | 14    |
| 3.2.1. Isıtarak toz bağlama tekniği .....                               | 14    |
| 3.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği .....                        | 23    |
| 3.2.3. Sıvayarak harç yığma tekniği .....                               | 24    |
| 3.2.4. Tarayarak ışıkla kür tekniği .....                               | 27    |
| 3.3. Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri Kullanım Alanları .....       | 33    |
| 3.3.1. Kavramsal modelleme uygulamaları .....                           | 33    |

**Sayfa**

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2. Fonksiyonel prototipleme uygulamaları .....                      | 34 |
| 3.3.3. Doğrudan döküm kalıbı üretimi .....                              | 35 |
| 3.3.4. Hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretimi .....   | 36 |
| 3.3.5. Analiz ve test uygulamaları .....                                | 37 |
| 3.3.6. Hızlı kalıp imalatı uygulamaları .....                           | 39 |
| 3.3.7. Doğrudan imalat uygulamaları .....                               | 41 |
| 3.3.8. Medikal uygulamalar .....                                        | 42 |
| 3.3.9. Kuyumculuk uygulamaları .....                                    | 43 |
| 3.3.10. Matematik, fizik ve kimya uygulamaları .....                    | 44 |
| 3.3.11. Sanat uygulamaları .....                                        | 46 |
| 3.3.12. Mimari uygulamalar .....                                        | 46 |
| 4. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                             | 48 |
| 4.1. Deney Modelinin Belirlenmesi .....                                 | 48 |
| 4.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan HPÜ Teknikleri ve Cihazları ..... | 50 |
| 4.2.1. Isıtarak toz bağlama tekniğini kullanan cihaz .....              | 53 |
| 4.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğini kullanan cihaz .....       | 53 |
| 4.2.3. Sıvayarak harç yığma tekniğini kullanan cihaz .....              | 54 |
| 4.2.4. Tarayarak ışıkla kür tekniğini kullanan cihaz .....              | 54 |
| 4.3. Üretimlerde Kullanılan Hammaddeler .....                           | 56 |
| 4.4. Üretim Zamanı ve Maliyetin Değerlendirilmesi .....                 | 56 |
| 4.4.1. Üretim zamanı .....                                              | 57 |
| 4.4.2. İşçilik .....                                                    | 58 |
| 4.4.3. Cihaz maliyetinin toplam maliyete yansıması .....                | 59 |

|                                                           | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------|--------------|
| 4.4.4. Hammadde maliyeti .....                            | 60           |
| 4.4.5. Toplam ürün maliyeti .....                         | 61           |
| 5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....                      | 63           |
| 5.1. Üretim Zamanı .....                                  | 63           |
| 5.1.1. İnşa öncesi hazırlık süreci ve zamana etkisi ..... | 63           |
| 5.1.2. İnşa aşaması .....                                 | 64           |
| 5.1.3. İnşa sonrası işlem süreçleri .....                 | 65           |
| 5.1.4. Toplam üretim zamanı .....                         | 67           |
| 5.2. Maliyet .....                                        | 69           |
| 5.2.1. İşçilik maliyetleri .....                          | 69           |
| 5.2.2. İşletme ve yatırım maliyetleri .....               | 70           |
| 5.2.3. Hammadde maliyetleri .....                         | 72           |
| 5.2.4. Toplam maliyet .....                               | 73           |
| 6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                | 77           |
| KAYNAKLAR .....                                           | 80           |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                            | 83           |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. PA2200 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                         | 18    |
| Çizelge 3.2. DuraForm PA ve GF malzemelerinin teknik özellikleri .....                                 | 19    |
| Çizelge 3.3. Somos 201 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                      | 20    |
| Çizelge 3.4. ST 100 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                         | 21    |
| Çizelge 3.5. Polistiren inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                     | 22    |
| Çizelge 3.6. ABS P400 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                       | 27    |
| Çizelge 3.7. Somos 14120 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                    | 30    |
| Çizelge 3.8. Somos 9120 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                     | 31    |
| Çizelge 3.9. RenShape SL7560 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                                | 32    |
| Çizelge 3.10. RenShape SL5510 inşa malzemesinin teknik özellikleri .....                               | 32    |
| Çizelge 4.1. Hızlı Prototipleme teknolojilerine sahip cihazların inşa yöntemlerine göre dağılımı ..... | 51    |
| Çizelge 4.2. EOSINTP380 HPÜ cihazı teknik özellikleri .....                                            | 53    |
| Çizelge 4.3. Z310 HPÜ cihazı teknik özellikleri .....                                                  | 53    |
| Çizelge 4.4. Dimension HPÜ cihazı teknik özellikleri .....                                             | 54    |
| Çizelge 4.5. SLA7000 HPÜ cihazı teknik özellikleri .....                                               | 54    |
| Çizelge 4.6. Deneylerde kullanılan hammaddeler .....                                                   | 56    |
| Çizelge 4.7. İşçiliğin hesaplanması .....                                                              | 58    |
| Çizelge 4.8. Yatırım maliyeti .....                                                                    | 59    |
| Çizelge 4.9. HPÜ cihazının maliyet etkisinin hesaplanması .....                                        | 60    |
| Çizelge 4.10. Deneylerde sarf edilen hammadde miktarları .....                                         | 60    |

| <b>Çizelge</b>                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 4.11. Toplam ürün maliyetini oluşturan unsurlar .....                    | 61           |
| Çizelge 4.12. Isıtarak toz bağlama tekniği için maliyet hesaplaması .....        | 62           |
| Çizelge 4.13. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği için maliyet hesaplaması ..... | 62           |
| Çizelge 4.14. Sıvayarak harç yığma tekniği için maliyet hesaplaması .....        | 62           |
| Çizelge 4.15. Tarayarak ışıkla kür tekniği için maliyet hesaplaması .....        | 62           |
| Çizelge 5.1. Toplam üretim zamanı .....                                          | 67           |
| Çizelge 5.2. Toplam üretim zamanını oluşturan süreler .....                      | 68           |
| Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan HPÜ cihazlarının birim maliyetleri .....      | 71           |
| Çizelge 5.4. Deneylerde sarf edilen miktarda hammadde maliyetleri .....          | 73           |
| Çizelge 5.5. Toplam maliyetin hesaplanması .....                                 | 74           |
| Çizelge 5.6. Toplam maliyet .....                                                | 75           |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                       | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. HPÜ Sisteminde genel basamaklar .....                                                            | 10    |
| Şekil 3.2. STL Formatına çevrilmiş örnek bir yüzey .....                                                    | 11    |
| Şekil 3.3. STL dosyası örneği .....                                                                         | 11    |
| Şekil 3.4. HPÜ teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması .....                          | 14    |
| Şekil 3.5. Isıtarak toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen parça .....        | 15    |
| Şekil 3.6. Isıtarak toz bağlama inşa tekniğinin aşamaları .....                                             | 16    |
| Şekil 3.7. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model ..... | 23    |
| Şekil 3.8. Sıvayarak harç yığma tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model .....        | 25    |
| Şekil 3.9. Tarayarak ışıkla kür tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model .....        | 28    |
| Şekil 3.10. HPÜ teknolojisinin medikal uygulama safhaları .....                                             | 42    |
| Şekil 3.11. Mücevher tasarım ve üretim uygulamasının aşamaları .....                                        | 44    |
| Şekil 4.1. Deney modeli ve üzerinde bulunan unsurlar .....                                                  | 49    |
| Şekil 4.2. Türkiye’de yerleşik HPÜ cihazlarının inşa yöntemlerine göre yüzdelik dağılımı .....              | 52    |
| Şekil 4.3. Farklı HPÜ cihazlarında üretilmiş deney modelleri .....                                          | 55    |
| Şekil 5.1. İnşa öncesi süreler .....                                                                        | 64    |
| Şekil 5.2. İnşa süreleri .....                                                                              | 65    |
| Şekil 5.3. İnşa sonrası süreler .....                                                                       | 66    |
| Şekil 5.4. Toplam üretim zamanı .....                                                                       | 68    |

| <b>Şekil</b>                                        | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.5. Yatırım maliyeti .....                   | 71           |
| Şekil 5.6. HPÜ cihazı saatlik maliyetleri .....     | 72           |
| Şekil 5.7. Hammadde maliyetleri .....               | 73           |
| Şekil 5.8. Toplam maliyet .....                     | 75           |
| Şekil 5.9. Üretim zamanı ve maliyet sonuçları ..... | 76           |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 3.1. Sütunlu destek yapıları .....                                                                             | 13    |
| Resim 3.2. Isıtarak toz bağlama tekniği ile inşa edilen örnek parçalar .....                                         | 17    |
| Resim 3.3. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile inşa edilen örnek parçalar .....                                  | 24    |
| Resim 3.4. Sıvıyarak Harç Yığma Tekniği ile Water Works destek malzemesi kullanılarak inşa edilmiş örnek parça ..... | 26    |
| Resim 3.5. Sıvıyarak harç yığma tekniği ile inşa edilen örnek parçalar .....                                         | 26    |
| Resim 3.6. Tarayarak ışıkla kür tekniği ile üretilmiş örnek parçalar .....                                           | 29    |
| Resim 3.7. HPÜ Teknolojisiyle inşa edilmiş motor modeli .....                                                        | 33    |
| Resim 3.8. Farklı HPÜ teknikleri ile inşa edilmiş fonksiyonel prototipler .....                                      | 34    |
| Resim 3.9. Porshe firması tarafından geliştirilen bir motora ait HPÜ prototipi .....                                 | 35    |
| Resim 3.10. Z Cast prosesi ile elde edilmiş döküm kalıbı .....                                                       | 36    |
| Resim 3.11. Hassas döküm tekniği ile üretilen metal parça ve prototipler .....                                       | 37    |
| Resim 3.12. Jet türbini optik gerilim analizi uygulaması .....                                                       | 39    |
| Resim 3.13. Takviyeli fotopolimer reçinesi ile üretilmiş kalıplar .....                                              | 39    |
| Resim 3.14. HPÜ prototipi kullanılarak hassas döküm ile imal edilmiş kalıplar .....                                  | 40    |
| Resim 3.15. Yüksek performanslı seramik filtreler .....                                                              | 41    |
| Resim 3.16. HPÜ teknolojisi kullanılarak üretilen ilaç kapsülleri .....                                              | 42    |
| Resim 3.17. Ameliyet planlamasında kullanılmış kafatası modelleri .....                                              | 43    |
| Resim 3.18. Molekül modeli ve topografik bir model.....                                                              | 44    |
| Resim 3.19. Isıtarak toz bağlama tekniği ile inşa edilmiş mobius bantları .....                                      | 45    |
| Resim 3.20. Tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilmiş Frakat ağacı .....                                         | 45    |
| Resim 3.21. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile üretilen Nucleosome modeli .....                                 | 45    |

| <b>Resim</b>                                                         | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.22. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş sanatsal modeller ..... | 46           |
| Resim 3.23. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mimari modeller .....   | 47           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Kısaltmalar | Açıklama                                      |
|-------------|-----------------------------------------------|
| Ar-Ge       | Araştırma ve Geliştirme                       |
| Ür-Ge       | Ürün Geliştirme                               |
| HPÜ         | Hızlı Prototip Üretimi                        |
| RP          | Rapid Prototyping                             |
| STL         | STereo Lithography                            |
| SL          | Stereo Lithography                            |
| CAD         | Computer Aided Design                         |
| FDM         | Fused Deposition Modeling                     |
| SLA         | Stereo LithogrAphy                            |
| SLS         | Selective Laser Sintering                     |
| LOM         | Laminated Object Manufacturing                |
| MJM         | Multi Jet Modeling                            |
| RTM         | Resin Transfer Method                         |
| UV          | Ultra Violet                                  |
| CT          | Computer Tomography                           |
| MR          | Magnetic Resonance                            |
| ABD         | Amerika Birleşik Devletleri                   |
| NASA        | National Aeronautics and Space Administration |
| CNC         | Computer Numerical Control                    |
| ABS         | Acrylonitrile Butadiene Styrene               |
| BASS        | Break Away Support System                     |
| DSPC        | Direct Shell Production Casting               |
| PA          | Polyamide                                     |
| GF          | Glass Filled                                  |

## 1. GİRİŞ

Dünya tarihinde, insanoğlu ihtiyaçlarını karşılamak için doğayı ve doğal kaynakları kullanmıştır. İnsanlığın ihtiyaçları geliştikçe kaynaklar yetersiz kalmış ve üretim sistemlerinin doğmasına neden olmuştur. Her geçen gün artan ihtiyaçlar üretim sistemlerini de gelişmeye sürüklemiştir. Üretim sistemlerindeki gelişmeler, ihtiyaçları daha iyi ve daha hızlı karşılamak amacına yoğunlaşarak teknoloji kavramını doğurmuştur. Tarihte başlayan bu zincirleme reaksiyon, günümüz çalışmalarında verimlilik, üretilebilirlik, kalite, zaman, maliyet gibi kavramları önemli hale getirmiştir [1].

Günümüz teknolojisinde, araştırma ve geliştirme (Ar-Ge), ürün geliştirme (Ür-Ge) çalışmaları ile ihtiyaçlara cevap verebilecek ürünler veya parçalar tasarlanmaktadır. Tasarım süreçlerinde dikkate alınan konular arasında, tasarımına devam edilen parçanın ihtiyaca uygun cevap verebilmesinin yanında, tasarım tamamlandığında üretilebilir olması ve bu üretilebilir tasarımın ihtiyaç arz ederek tasarım sürecinin başlamasına sebep olan insanlara yani pazara sunulduğunda temin edilebilir olması yer almaktadır. Bu noktada Ar-Ge ve üretim faaliyetlerini hızlandırmak ile birlikte bu faaliyetlerde görülen maliyetleri düşürmek önemi artan değerler haline gelmiştir [2].

Bilimsel öğrenme yöntemleri arasında yer alan deneme-yanılma yöntemi üretim sistemlerine uyarlandığında, tasarlanan üretimin amaca uygunluğunu öğrenmek için deneme ihtiyacı bulunmaktadır. Bu deneme ihtiyacı, teknolojik olanaklar çerçevesinde üretilen prototipler ile karşılanmaktadır. Prototip üretimi mevcut seri üretim teknikleri ile gerçekleştirildiğinde üretim zamanı ve maliyet açısından verimsiz şartlar ortaya koymaktadır. Bu anlamda, gereksinimleri karşılamak için geliştirme çalışmaları devam eden *Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri*, (HPÜ) olarak adlandırılan teknolojiler, model üretim sistemlerinin önemli teknolojileri arasında yer almaktadır [3].

HPÜ teknolojilerinde üretilmesi istenilen parçaların öncelikle bilgisayar desteği ile üç boyutlu modelleri oluşturulur. Üç boyutlu tasarım, endüstriyel tasarım teknikleri ile bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılabileceği gibi hazır bir model üzerinden üç boyutlu dijital veya optik tarayıcılar kullanılarak elde edilebilir. Üretilmesi istenen parçanın tasarımı modelin sınırlarını, iç ve dış yüzeylerini içermelidir. Bu üç boyutlu tasarım verisi Stereolithography (STL) veri formatına dönüştürülerek HPÜ tekniklerinde kullanılabilir hale getirilir. STL veri formatında model üçgenlerden oluşmuş yüzeylerden ibarettir. Eldeki veri sorgulandıktan sonra dilimlere ayrılır ve dilimler sistematik bir şekilde katmanlar halinde inşa edilir [4].

Planlanan üretim için kullanılacak HPÜ cihazını seçerken yapılan değerlendirmelerde yer alan kriterler içerisinde üretim zamanı ve maliyet etkileride bulunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen veriler incelendiğinde, HPÜ teknolojilerindeki ilerlemeler oldukça iyi sonuçlar doğurmuştur. Tamamlanmış veya gelecekte tamamlanacak olan çalışmalara ışık tutması ve sektörün endüstriyel çalışmalarına verimlilik katkısı sağlayabilmek hedeflenmiştir. Bu anlamda çalışma, “Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks ve Mikro Yapıdaki Parçaların Üretilirliklerinin Araştırılması” konulu çalışma [5] temel alınarak, çalışmanın devamı niteliğinde hazırlanmıştır.

Hedeflenen ve gerçekleştirilen amaçlar aşağıdaki başlıklar altında toplanmıştır;

- i) HPÜ teknolojileri kullanılarak daha verimli sonuçlar elde edilebilecek bir model seçimi ve tasarımının gerçekleştirilmesi. Belirlenen modelin HPÜ cihazlarında inşa safhalarının gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan, modele ait ara yüzeylerin verimlilik çalışmalarının yapılması.
- ii) Üretim sektöründe kullanılan, ülkemizde yerleşik ve dünyada yaygın olan, farklı özelliklere sahip HPÜ cihazları ile inşa işlemlerinin üretim zamanı ve maliyet etkileri kontrol altına alınarak gerçekleştirilmesi.
- iii) Farklı HPÜ cihazlarında üretilen parçalardan elde edilen bulguların, üretim zamanı ve maliyet açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi.

Bu amaçların gerçekleştirilmesinde kullanılacak deney modeli, üretilebilirlik açısından zorlayıcı unsurlar taşıması nedeni ile prototip ihtiyacının karşılanması için HP teknolojileri kullanımına sevk eder niteliktedir.

Çalışma dahilinde, deney modeli seçimi ve tasarımı tamamlandıktan sonra modele ait CAD datası STL formatına dönüştürülmüştür. STL formatındaki data Materialise MagicsRP yazılımı kullanılarak ara yüzeylerin verimlilik çalışmaları yapılmıştır. Bu aşamalar inşa öncesi hazırlık aşamaları olarak değerlendirilmiştir. Bu sürecin tamamlanması ile model HP cihazlarında inşa edilebilir niteliğe sahip olmuştur.

Farklı prensiplerle çalışan, ülkemiz endüstri sektöründe yatırımı yapılarak faal kullanımına devam edilen HP cihazları incelenerek seçimi yapılmış dört değişik HP cihazında inşa işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üretim zamanı ve maliyet açısından gözlemler yapılarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, hedeflenen amaçlar çerçevesinde gerçekleştirilen çalışma ile elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve endüstriyel uygulamalar açısından önerilerde bulunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Endüstride Kullanımı

Hızlı prototipleme alanındaki ilk araştırmacılar, Sach ve arkadaşları olup HPÜ tekniği kullanarak bir CAD modelden doğrudan parça üretimine girişmişlerdir. Toz halindeki hammaddenin katmanlar halinde çökertilmesinde 3 boyutlu yazıcı fonksiyonlarını ve tozun seçici bağlanması toza göre seçilen bağlayıcı malzemeyi püskürten bir jet sistemi kullanmışlardır. Bu çalışma, günümüzde kullanılan HPÜ teknolojilerinin temelini oluşturmakla beraber, yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinin ticari kullanıma sunulmasında etkili olmuştur [6].

Jacob, HPÜ teknolojilerini sıvı polimerizasyon, sıvı olarak harç yığıma (FDM – Fused Deposition Modelling), ısıtarak toz bağlama (SLS– Selective Laser Sintering) ve noktadan noktaya katılaştırma olarak sınıflandırmıştır. Jacob’ un yaptığı bu sınıflandırma kapsamında devam eden çalışmalar sıvı olarak harç yığıma ve ısıtarak toz bağlama tekniklerinin ticari kullanıma başarı ile sunulmasını sağlamıştır [7].

Gruel, fonksiyonel uygulama ve testler için bir HPÜ teknolojisi geliştirmiştir. Bu çalışmada FDM ve kaybolan modelle kalıplama proseslerinin bir kombinasyonu kullanılmıştır. Paslanmaz çelik metalik malzemelerin üretimi için “Çoklu Jet Katılaştırma (MJM – Multi Jet Modelling)” olarak adlandırılan yeni bir HPÜ tekniği geliştirmiştir. Williams ve arkadaşları; Gruel’in yaptığı bu çalışmanın yapım şekline etkileri, boyutsal hassasiyet performansı sonuçlarını araştırmıştır. Bütün bu prototipler SLA-250 cihazı üzerinde ve SL5170 fotopolimer kullanarak gerçekleştirilmiştir [8].

Uçak endüstrisinin zorlu üretim şartları, Jetliner’ın jeneratör tasarımı gibi parçaların tasarımı ve üretimini oldukça hassas bir noktaya taşımaktadır. Bir jeneratör 1200 adet iç parçadan oluşmaktadır. Bu yüzden karmaşık parçaları iki hatta üç boyutlu çizimlerden canlandırmak oldukça zordur. Ancak HPÜ teknolojileri ile klasik yöntemlerle aylarca sürebilecek çalışma iki hafta içerisinde söz konusu parçaların

prototipini elde etmek mümkün olmuş ve daha sonra prototip halinde parçaların montajı sağlanıp hata olup olmadığı gözlemlenebilmiştir. Allied-Signal firması, HPÜ teknolojileri kullanarak turbo fan jet bileşenlerini imal etmiş, elde edilen parça modelleri kullanılarak, tarayarak ışıkla kür teknolojisi ile hassas döküm modelleri doğrudan imal edilebilmiştir [9].

Jamieson, Holmer ve Ashby'nin de belirttiği gibi, özellikle ortopedi alanında HPÜ teknolojileri yaygın bir şekilde görülmektedir. Örneğin diz kapağı gibi eklem hastalıkları oldukça acı vermekte ve hastaya her zaman uygun protez seçimi yapılamamaktadır. Ancak HPÜ teknolojilerinin kullanılmasıyla, çok fazla deneme ve iterasyona gerek duyulmadan doğru eklem protezlerini elde etmek mümkün olmaktadır [10].

İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü (Swiss Federal Institute of Technology) bünyesinde geliştirilen ve mikrosteryolitografi (microstereolithography), kısaca micro SLA olarak adlandırılan henüz ticari olmamış teknoloji ile 5-10 mikron hassasiyetle parçalar imal edilebilmektedir [10,11].

Chigago Üniversitesinde, bir kulağını kaybetmiş bir hastaya, diğer kulağının 3B (üç boyulu) verisine bağlı olarak yeniden kulak protezi yapılmıştır. Yine Chigago Üniversitesinde, kanser sebebiyle boğaz etinin bir kısmı alınmış olan hastanın kalan boşluğuna 3B CT (Computer Tomography) verisine bağlı olarak bir protez yapıp yerleştirilmiştir. Önceleri hastanın bu boşluğuna macun halinde malzeme sıkıştırılarak kalıbı alınıyordu ama macunun oluşturduğu basınç, boşluğu esneterek gerçek geometriye uygun protez yapılmasını engelliyordu. Artık 3B CT verisine bağlı olarak, hastaya dokunmadan protez tasarlanıp imal edildiği için bu problem çözülmüştür [12].

Stratasys firmasının teknoloji ofis şefi ve başkanı olan S.Scott Crump tarafından, doğrudan kullanılabilecek plastik ürünlerin sıvayarak harç yığma HPÜ tekniği ile inşasında kullanılabilecek inşa malzemeleri incelenmiştir [13].

NASA (National Aeronautics and Space Administration) bünyesinde Marshall Uzay ve Havacılık Merkezinde A.M. Springer tarafından yüksek hız rüzgar tüneli testi için bir model geliştirilmiş ve bu model dört farklı HPÜ yöntemi kullanılarak inşa edilmiştir. İnşa edilen modeller yüksek hız rüzgar tüneline test edilerek sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [14].

2003 yılında Anna Bellini ve Selçuk Güçeri tarafından yapılan çalışma ile sıvayarak harç yığıma tekniği ile inşa edilmiş parçaların mekanik karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda, söz konusu tekniğin endüstride yaygınlaşabilmesi için üretim zamanı ve maliyet etkilerinin iyileştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmasını önermişlerdir [15].

Guangchun ve arkadaşları Shandong üniversitesinde gerçekleştirdikleri çalışmalar ile ürün geliştirme uygulamalarına yönelik bir hızlı tasarım ve üretim sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu sistem bünyesinde HPÜ tekniklerinden faydalanmışlardır. Bu çalışma kapsamında, HPÜ tekniklerinde üretim zamanı etkisinin önemi ayrıca vurgulanmıştır [16].

Mahesh ve arkadaşları Singapur Ulusal Üniversitesinde gerçekleştirdikleri çalışmada HPÜ sistemleri ve proseslerinin karşılaştırılması için bir modelin dört farklı HPÜ cihazında inşa işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sonrasında, HPÜ cihazlarından elde edilen modeller üzerinde testler yaparak cihaz seçiminde etkili unsurları araştırmışlardır. Cihaz seçimine etkisi olan unsurlar arasında, yüzey pürüzlülüğü mekanik dayanım, nem dayanımı gibi hedef kaliteye uygunluk kriterleri sonuçlarda sunulmuştur [17].

Li ve arkadaşları 2004 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada insan iç organlarına ait CT verilerini kullanarak bu organların sahip olduğu kompleks yüzeyleri HPÜ sistemlerinde inşa edilebilir formata dönüştürmüşlerdir [18].

Zhengyu ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada HPÜ sistemlerinde boşluklu yapıya sahip modellerin inşa süreci ve sonuçlarını inceleyerek HPÜ sistemlerinde

boşluklu yapılara sahip modellerin inşası için bir yöntem geliştirmişlerdir [19].

## **2.2. Hızlı Prototipleme Teknolojilerinde Üretim Zamanı ve Maliyet**

Hopkinson ve Dickens 2001 yılında yaptıkları çalışmada üretilebilirlik, üretim zamanı, üretim maliyeti, malzeme özellikleri ve ürün kalitesi başlıkları altında HPÜ yöntemlerine uygun doğrudan üretimi gerçekleştiren parçaları araştırmışlar [20].

Knitter ve arkadaşları 2002 yılında yaptıkları bir çalışmada seramik bazlı parçaların üretimi için gerçekleştirilen HPÜ süreçlerini incelemiş ve bu süreçlere bağımlı olarak inşa edilen seramik bazlı parçalar üzerinde testler gerçekleştirerek sonuçlarını tartışmışlardır. Knitter ve arkadaşları bu çalışmada üretim zamanı açısından incelemelerde de bulunmuştur [21].

Brent Stucker ve Xiuzhi Qu 2003 yılında yaptıkları bir çalışmada HPÜ sistemi ve CNC (Computer Numerical Control) sistemi kullanılarak üretilen parçalar üzerinde bu iki sistemi kapsayan son işleme stratejilerini sonuç maliyetlerini de karşılaştırarak incelemişlerdir [22].

Mark A.Evans ve R. Ian Campbell tarafından 2003 yılında gerçekleştirilen çalışmada alışılmış imalat teknikleri ve ışıkla kür HPÜ tekniği kullanılarak üretilen endüstriyel modellerin karakteristik özellikleri, üretilebilirlik değerleri, üretim zamanları incelenmiştir [23].

Ippolito ve arkadaşları, beş farklı HPÜ tekniğiyle üretilmiş HPÜ modellerini yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti konusunda karşılaştırmış ve bir HPÜ parçasını üretmek için üretim zamanı ve maliyet unsurlarını da dikkate alarak bir cihaz önermişlerdir [24].

Üretim zamanı ve maliyet açısından en geniş içeriğe sahip çalışma ise 2003 yılında Todd GRIMM tarafından “Rapid Prototyping Benchmark: 3D Printers” adı ile T.A.Grimm&Associates, Inc. Edgewood, Kentucky, USA laboratuvarlarında farklı

hızlı prototipleme cihazlarının üretilebilirliği, üretim zamanı ve maliyetleri üzerine yapılmıştır [25].

### 2.3. Literatür Değerlendirmesi

HPÜ teknolojileri konusunda yapılan bilimsel çalışmaların uzun yıllar önce literatürde yer aldığı görülmektedir. Yapılan ilk çalışmaların, tasarımı tamamlanan CAD verisinin HPÜ teknolojileri ile doğrudan üretimi üzerine amaçlandığı saptanmıştır. Çalışmaların devamlılığı sayesinde farklı prensiplere dayalı HPÜ teknolojileri ortaya çıkarılmıştır. Ortaya çıkarılan HPÜ teknolojilerinden 5 farklı teknik üretim sektöründe yer edinmiştir. Bu HPÜ teknikleri doğrudan üretimden daha çok prototip üretimi üzerine yönelmiştir. HPÜ teknikleri ile üretilen prototipler sayesinde birçok gelişmiş saha testleri, laboratuvar denemeleri ve mühendislik analizleri başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. HPÜ teknolojileri, bu verimli süreç sayesinde imalat endüstrisinin bir çok alanından tıp sektörüne, sanatsal eserlerin üretiminden matematik teorilerinin doğrulanmasına kadar çok farklı alanlarda uygulanarak oldukça geniş bir üretim yelpazesine ulaşmıştır [3].

Son yıllarda HPÜ teknolojileri ile ilgili gerçekleştirilen literatür çalışmaları, HPÜ teknolojilerine uygun olarak hangi tekniğin doğrudan üretimi, hangi tekniğin prototip üretimini verimli bir şekilde gerçekleştirebileceğinin belirlenmesi yönünde yapılmıştır. Prototip ihtiyacının HPÜ teknolojileri ile karşılanabilirliği araştırılırken tasarlanan parçayı başarı ile üretebilmek için hangi HPÜ teknolojisinin seçilmesi gerektiği ve farklı HPÜ cihazlarının kullanılması durumunda ulaşılabilecek sonuçlar arasındaki farklılıkların ne olacağı konusunda yapılan çalışmalar literatürde yer almaktadır.

Literatür dahilinde HPÜ inşa süreçlerinin incelenerek üretim zamanı ve maliyet analizleri gerçekleştirildiği ancak bu çalışmalarda incelenen teknolojilerin ve cihazların ülkemizde yaygın kullanılmadığı görülmektedir.

Bu çalışma, literatür çalışmalarını destekleyici yönde farklı HPÜ teknolojilerinde

Üretilen modeller ile ülkemizde yerleşik ve yaygın kullanılan farklı HP teknolojilerini üretim zamanı ve maliyet kriterleri bazında birbirleriyle karşılaştırmayı hedeflemektedir. Böylece, HP teknolojileri kullanılarak prototip üretiminde uygun cihaz seçimi konusunda önem taşıyan, üretim zamanı ve maliyet etkilerinin karşılaştırmalı araştırması literatüre sunulmuştur.

### 3. HIZLI PROTOTİP ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ

#### 3.1. Hızlı Prototip Üretimi

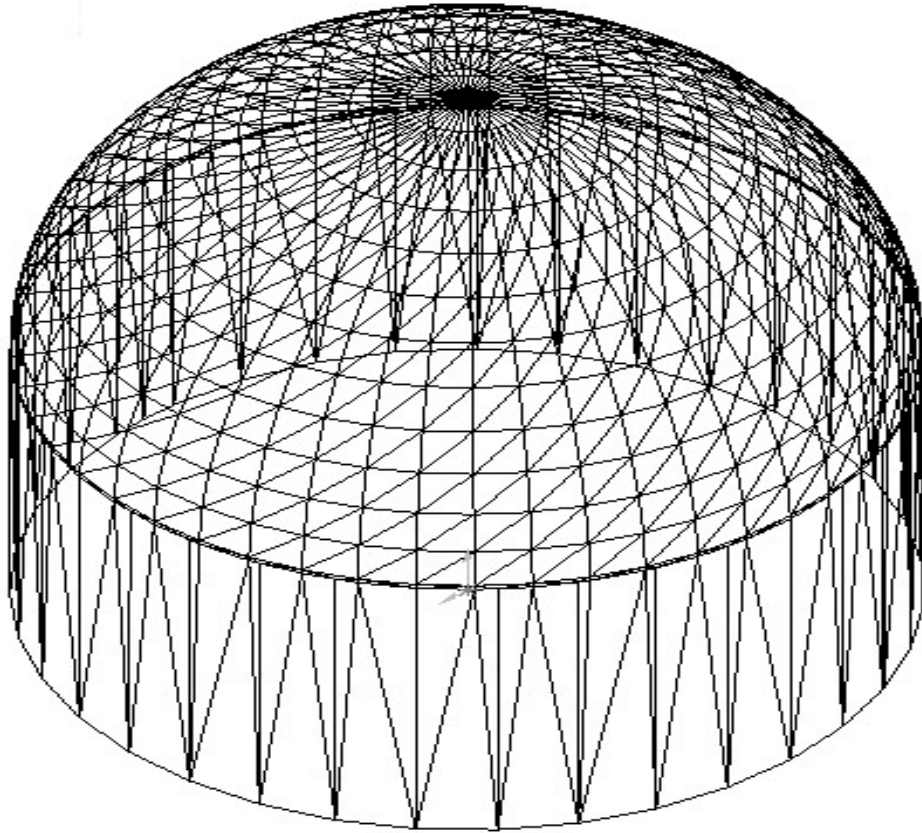
HPÜ sistemleri genel olarak Şekil 3.1’de de görülen basamakların sırasıyla izlenmesiyle oluşur;

- i) CAD modelin oluşturulması,
- ii) Modelin arayüz formatına dönüştürülmesi,
- iii) Parçanın Z ekseninin belirlenip, destek yapıların oluşturulması,
- iv) Parça ve desteklerin belirlenen Z ekseninde dilimlenmesi,
- v) Gerekli işleme parametrelerinin seçimi,
- vi) Prototipin üretilmesi,
- vii) Prototipin alınıp son işlemlerin yapılması [26].

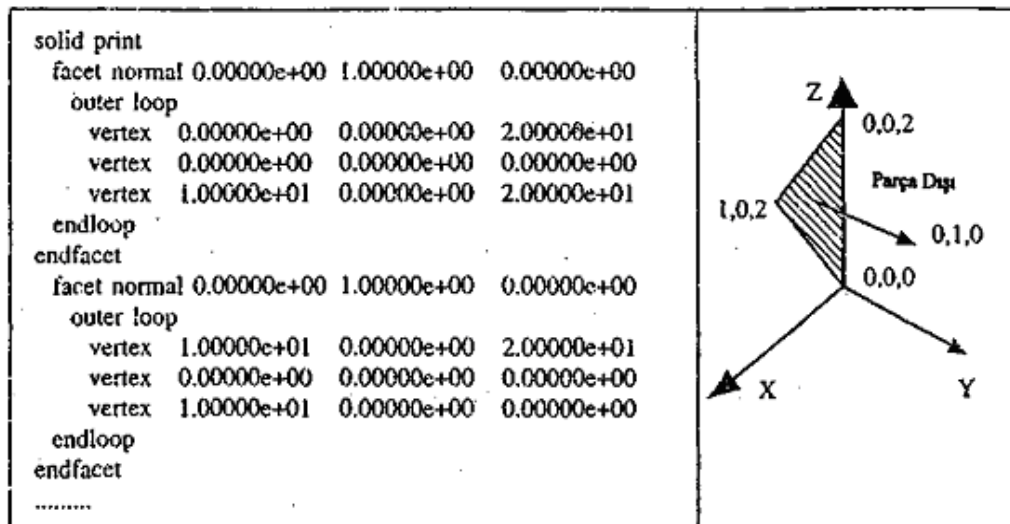


Şekil 3.1. HPÜ sisteminde genel basamaklar [3, 26]

Bilgisayar ortamında hazırlanmış üç boyutlu tasarımın HPÜ sistemlerine naklini sağlamak için ara yüzeye ihtiyaç duyulmaktadır. HPÜ cihazlarında yaygın kullanılan ara yüzey STL formatıdır. 3D Systems firması tarafından geliştirilen STL formatı CAD sistemleri veritabanı tarafından türetilir. Bu format modelin dış yüzeyini temsil eden sıralanmamış üçgen yüzeyler listesinden oluşmaktadır. Şekil 3.2' de STL formatında örnek bir yüzey görülmektedir. STL datası, model yüzeyini saran üçgen yüzey parçacıklarını oluşturan üç vektör ve bir normal vektörü ile tanımlanır. Şekil 3.3' de STL datası örneği görülmektedir.



Şekil 3.2. STL formatına çevrilmiş örnek bir yüzey [3, 26]



Şekil 3.3. STL dosyası örneği [26, 24]

STL formatı kullanmanın birçok belirgin avantajı vardır. Öncelikle 3 boyutlu CAD verilerinin basit bir şekilde temsil edilmesini sağlar. İkinci olarak çoğu HPÜ ve CAD sisteminde kullanılabilmesidir. Bir diğer avantajı da geometrik şekillerin veri transferi için basit dosyalar sağlamasıdır [25, 24].

STL formatının avantajlarının yanında birçok da dezavantajı vardır. Öncelikle STL formatı çoğu kez orijinal CAD veri dosyasından daha büyük yer kaplamaktadır. STL formatı çok fazla gereksiz bilgi içermektedir. İkinci olarak STL formatında geometri kusurları bulunmaktadır. Çünkü çoğu ticari CAD sağlayıcıları tarafından kullanılan dönüştürme algoritmaları günümüzde yetersiz kalmaktadır.

Bu üretimi yavaşlatan kusurlar sebebiyle bir onarım yazılımına olan ihtiyaç artmaktadır. Son olarak ise büyük STL dosyalarını dilimlenmesinin saatler almasıdır [26, 24].

STL Formatında karşılaşılan problemler [26];

- i) Boşluklar (çatlaklar ve delikler), kayıp üçgen yüzeyler
- ii) Tahrip olmuş yüzeyler
- iii) Üst üste binmiş yüzeyler
- iv) Ortak noktalı yüzeyler

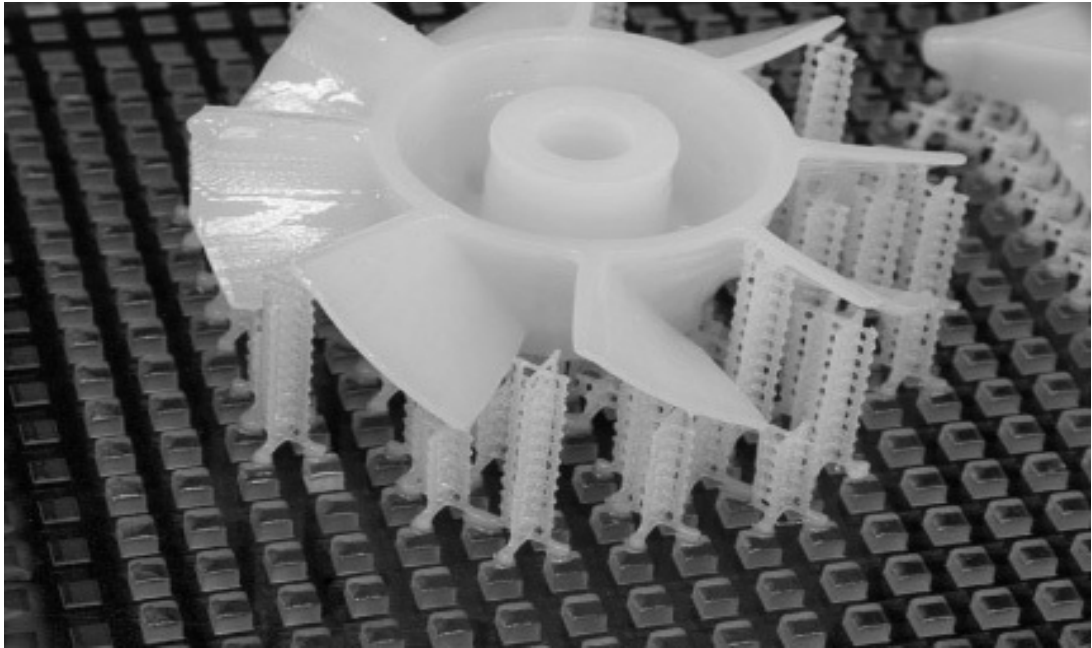
HPÜ teknolojilerinde inşa aşamasında modelin ana unsuru olmayan boşluk alanlar destek yapıları ile inşa edilir. Bu sayede, inşa esnasında ana unsurların çevresindeki boşluğa yer çekimi etkisi ile çökmemesini sağlanmaktadır. İnşa aşaması tamamlandığında destek yapıları, destek yapısının niteliğine bağlı yöntemlerle parça üzerinden temizlenir.

Destek yapıları, çevreleyici destek ve sütunlu destek olmak üzere iki temel türde kullanılmaktadır.

Çevreleyici destek kullanan tekniklerde üretilen parça dışında kalan hacime farklı kimyasal özelliğe sahip destek malzemesi ayrıca inşa edilir ve inşa aşaması tamamlandığında parça malzemesi ile destek malzemesinin hammadde farklılıklarından yararlanarak ısıtma, eritme, kimyasal temizleme gibi yöntemler ile parça üzerinden ayrıştırılır.

Sütunlu destek kullanan tekniklerde ise ön hazırlık işlemlerinde tespit edilen konumlara, hazırlık işlemleri dahilinde tasarlanan konstrüktif destek yapıları parça inşası esnasında ayrıca inşa edilir.

Resim 3.1’ de sütunlu destek yapısı örneği görülmektedir. İnşa aşaması tamamlandığında sütunlu destek yapıları kırılarak parça üzerinden temizlenir.



Resim 3.1. Sütunlu destek yapıları [3, 26]

### 3.2. HPÜ Teknolojileri

Dünya'da ve ülkemizde kullanılan HPÜ cihazlarının çalışma prensiblerindeki ortak nokta, parçaların katmanlar halinde inşa edilmesidir. İnşa hammaddeleri ve katmanları inşa etme yöntemlerindeki değişiklikler HPÜ teknolojileri arasındaki farklılıkları belirlemektedir. HPÜ cihazları, kullandığı teknolojiye göre ışıkla kür, toz bağlama, harç yığma ve tabaka yığma olmak üzere dört ana katagori altında toplanabilir. Şekil 3.4' de HPÜ teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.4. HPÜ teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması [3, 26]

Bu teknolojilerden, çalışma kapsamında kullanılan metotlar detaylı olarak ele alınmış, diğer metotlardan da kısaca bahsedilmiştir.

#### 3.2.1. Isıtarak toz bağlama tekniği

Isıtarak toz bağlama tekniği ingilizce literatürde Selective Laser Sintering (SLS) adı ile yer almaktadır. Bu teknoloji ilk olarak Texas Üniveristesinde ki bir doktora çalışması çerçevesinde Carl Decard tarafından geliştirilmiştir.

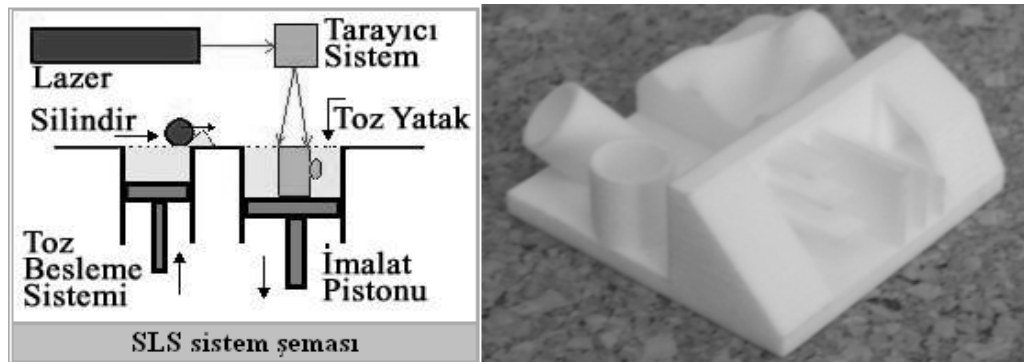
Isıtarak toz bağlama teknolojisi, Nova Automation ismi ile 1987 yılında kurulan Direct Tolling Manufacture Corp. tarafından 1992 yılında ticari hale getirilmiştir.

Eylül 2001 tarihinde ısıtarak toz bağlama teknolojisi, bu firmayı satın alınmasıyla 3D Systems firmasının ürün yelpazesine dahil olmuştur [3].

Isıtılması halinde birbirine kaynaşabilen toz taneciklerini inşa hammaddesi olarak kullanan bu teknikte, toz formundaki hammadde ince ve düzgün bir düzlemsel katman halinde yayılır. Seçimi önceden yapılmış bölgeler lazer ışını ile taranır. Lazer ışınının yüzeye çarptığı noktalarda meydana gelen sıcaklık, toz taneciklerinin ısınmasına ve kısmen eriyerek/sinterlenerek birbirleri ile kaynaşmasına sebep olur.

Bu işlemlerin ardından inşa bölgesini taşıyan platform katman kalınlığı kadar aşağıya taşınır ve çevrim tekrarlanarak katmanlar halinde inşa aşaması devam ettirilir. İnşa aşaması son katmana kadar devam ederken lazer etkisi ile sinterlenmeyen tozlar doğal bir destek yapısı oluşturur. İnşa aşaması tamamlandığında destek yapısını teşkil eden serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile ortamdan uzaklaştırılarak üretilen parça veya parçalar cihaz platformundan alınır.

Şekil 3.5' te ısıtarak toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş parça örneği görülmektedir.



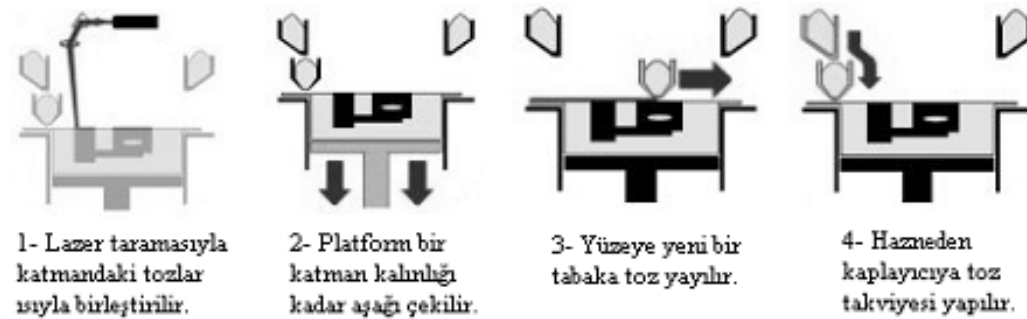
Şekil 3.5. Isıtarak toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen parça [26]

Lazer ışının tozları verimli şekilde kaynaştırabilmesi için inşa yüzeyi harici ısıtıcılarla desteklenir. Böylece daha az enerji harcanarak maliyet düşürülür ve üretim zamanı kısaltılır. İnşa hammaddesi olarak, metal tozları kullanıldığında kaynaşmayı

engelleyen oksitlenme problemini ortadan kaldırmak amacı ile ortama oksijeni giderici gaz doldurulur. Bu gaz kullanılan cihaz ve hammaddenin özelliklerine göre seçilmektedir ve genellikle argon gazı kullanılmaktadır.

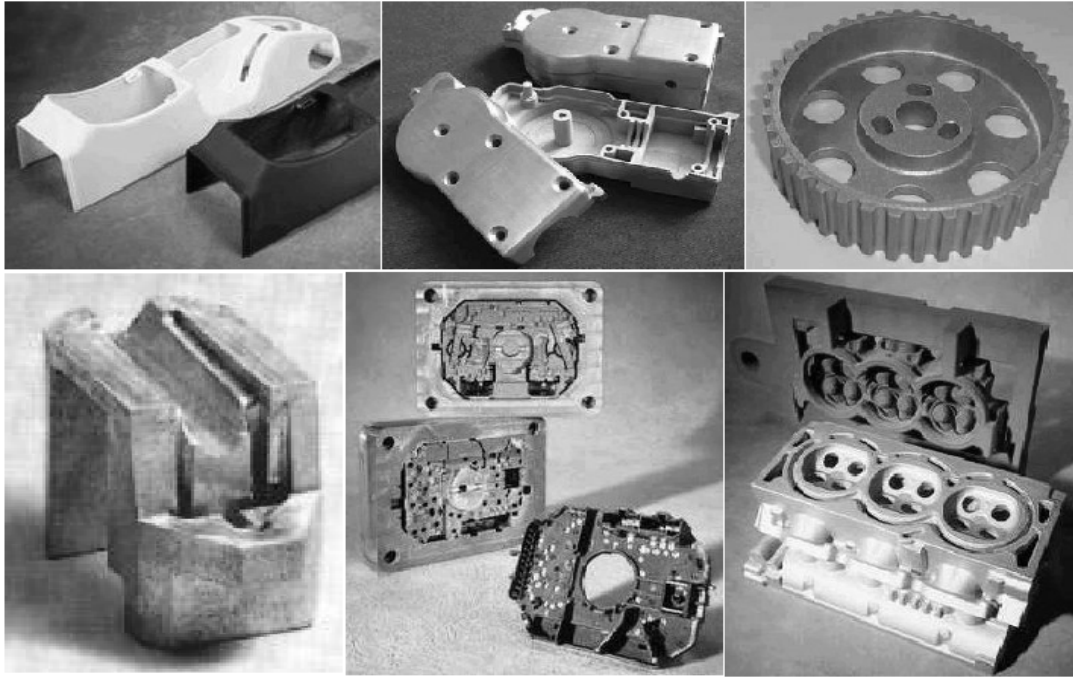
Isıtarak Toz Bağlama Tekniğinin Avantajları [26];

- i) Birim zamanda sonuçlandırılan üretim miktarı nispeten yüksektir. Toz malzeme oldukça kolay ve hassas bir şekilde işlenebildiğinden teknik verimlidir.
- ii) Malzeme olarak; mum, naylon, polikarbonatlar, plastik, metal veya seramik tozları kullanılabileceği gibi bunların karışımlarından oluşan kompozit tozlarında dahil olduğu geniş bir hammadde yelpazesi sunar.
- iii) Isıtarak toz bağlama tekniği ile imal edilmiş model için gerekli inşa sonrası işlemler minimum seviyededir. Böylece, toplam üretim zamanında fayda sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Isıtarak toz bağlama inşa tekniğinin aşamaları [3, 26]

Resim 3.2' de Isıtarak toz bağlama tekniği ile üretilmiş örnek parçalar görülmektedir. Örnek parçalar incelendiğinde, üretilebilirlik kriterlerinin geniş olduğu, farklı hammaddeler kullanılarak farklı özellik ve yapılarda üretimler yapılabildiği anlaşılmaktadır.



Resim 3.2. Isıtarak toz bağlama tekniği ile inşa edilen örnek parçalar [3, 26]

Isıtarak toz bağlama tekniğinde inşa malzemesi olarak plastik, metal veya seramik tozları kullanılabileceği gibi bunların karışımlarından oluşan kompozit tozlar da kullanılabilir. Cam elyaf takviyeli plastik tozları veya üzeri plastik kaplı metal tozları kompozit tozlara verilebilecek örneklerdendir [27-28].

Isıtarak toz bağlama tekniğinde kullanılan başlıca inşa malzemeleri ve bu malzemelerin teknik özellikleri ile malzemelerin üretim zamanı ve maliyet açısından etkileri aşağıda incelenmiştir.

#### PA 2200

*Malzeme Sınıfı* : Polyamide toz

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Kolay bulunabilir ve stoklamaya elverişli olması nedeni ile malzeme maliyetlerini azaltır. Isıtarak toz bağlama tekniğinde ergime sıcaklığı nedeni ile nispeten hızlı inşa edilebilir olması nedeni ile üretim zamanını azaltır. Isıtarak toz bağlama tekniğinde kullanılabilecek en ekonomik malzemedir. Isıtarak toz bağlama tekniğinde kullanılan PA 2200 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. PA 2200 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 26]

| <b>Toz Özellikleri</b>              | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>PA 2200</b> |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| Yoğunluk                            | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D4164         | 0,9 – 0,95     |
| Ortalama Partikül Boyutu            | µm                | Optik Ölçüm        | 60             |
| Hacimsel Yoğunluk                   | g/cm <sup>3</sup> | DIN53466           | 0,435 – 0,445  |
| <b>Termal Özellikler</b>            | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>PA 2200</b> |
| Erime Noktası                       | °C                | DIN53736           | 172-180        |
| Yumuşama Sıcaklığı B/50 - A/50      | °C                | DIN EN ISO 306     | 163 -181       |
| <b>Mekanik Özellikler</b>           | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>PA 2200</b> |
| Gerilme Dayanımı                    | N/mm <sup>2</sup> | DIN EN ISO 527     | 4,5±3          |
| Gerilme Modülü                      | N/mm <sup>2</sup> | DIN EN ISO 527     | 1700±150       |
| Kırılma Uzaması                     | %                 | DIN EN ISO 527     | 20±5           |
| Bükülme Modülü                      | N/mm <sup>2</sup> | DIN EN ISO 178     | 1240±130       |
| Çarpma Dayanımı – Çentikli, CHARPY  | kJ/m <sup>2</sup> | DIN EN ISO 179     | 4,8±0.3        |
| Çarpma Dayanımı – Çentiksiz, CHARPY | kJ/m <sup>2</sup> | DIN EN ISO 179     | 53±3.8         |
| Çarpma Dayanımı – Çentikli, IZOD    | kJ/m <sup>2</sup> | DIN EN ISO 180     | 4,4±0,4        |
| Çarpma Dayanımı – Çentiksiz, IZOD   | kJ/m <sup>2</sup> | DIN EN ISO 180     | 32,8±3,4       |
| Sertlik, Bilye Çentik Testi         |                   | DIN EN ISO 2039    | 77,6±2         |
| Sertlik                             | Shore D           | DIN 53505          | 75±2           |

DuraForm Polyamide (PA) ve Glass-filled (GF) Naylon

*Malzeme Sınıfı* : Termoplastik toz

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Plastik esaslı yapısı dolayısı ile stoklanabilir malzemeler arasındadır. Teknik özelliklerindeki üstünlükler nedeni ile yüksek malzeme maliyeti özelliği sergilemektedir. Nihai üründe ısıl direncin yüksek olması hedeflenmesi nedeni ile inşa aşamasında nispeten daha fazla zaman gereksinimi vardır. DuraForm PA ve GF malzemelerinin teknik özellikleri Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. DuraForm PA ve GF malzemelerinin teknik özellikleri [27]

| <b>Toz Özellikleri</b>                                                                      | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| Yoğunluk                                                                                    | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D4164         | 0,59                   | 0,84                    |
| Ortalama Partikül Boyutu                                                                    | µm                | Optik Ölçüm        | 58                     | 48                      |
| Partikül Ölçü Aralığı - % 90                                                                | µm                | Optik Ölçüm        | 25 - 92                | 10 – 96                 |
| Spesifik Ağırlık – 20 °C                                                                    |                   | ASTM D792          | 0,97                   | 1,40                    |
| Nem Alma Oranı – 23 °C                                                                      | %                 | ASTM D570          | 0,41                   | 0,30                    |
| <b>Termal Özellikler</b>                                                                    | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
| Erime Noktası                                                                               | °C                | DSC                | 184                    | 185                     |
| 0,45 MPa Basınç Altında Erime Noktası                                                       | °C                | ASTM D648          | 177                    | 175                     |
| 1,82 MPa Basınç Altında Erime Noktası                                                       | °C                | ASTM D648          | 86                     | 110                     |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                                                                   | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
| Gerilme Dayanımı                                                                            | MPa               | ASTM D638          | 44                     | 38,1                    |
| Gerilme Modülü                                                                              | MPa               | ASTM D638          | 1600                   | 5910                    |
| Kırılma Uzunluğu                                                                            | %                 | ASTM D638          | 9                      | 2                       |
| Bükülme Modülü                                                                              | MPa               | ASTM D790          | 1285                   | 3300                    |
| Çarpma Dayanımı – Çentikli                                                                  | J/m               | ASTM D256          | 214                    | 96                      |
| Çarpma Dayanımı – Çentiksiz                                                                 | J/m               | ASTM D256          | 428                    | 101                     |
| <b>Yüzey Kalitesi</b>                                                                       | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
| Üst Yüzey – İnşa Sonrası, Ra                                                                | µm                |                    | 8,5                    | 6,2                     |
| Üst Yüzey–Yüzey İşlemleri Sonrası, Ra                                                       | µm                |                    | 0,13                   | 1,0                     |
| <b>Elektriksel Özellikler</b>                                                               | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
| Hacimsel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V                                                       | ohm x cm          | ASTM D257-93       | 3,1 x 10 <sup>14</sup> | 2,0E x 10 <sup>14</sup> |
| Yüzeysel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V                                                       | ohm x cm          | ASTM D257-93       | 3,0 x 10 <sup>14</sup> | 2,3E x 10 <sup>14</sup> |
| Dielektrik Sabiti - 22 °C, %50 RV, 5V                                                       |                   | D150-95            | 2,9                    | 3,7                     |
| Dielektrik Dayanım - 22 °C, %50 RV                                                          | V/mm              | D149-95a           | 1,6 x 10 <sup>4</sup>  | 1,5E x 10 <sup>4</sup>  |
| <b>Kimyasal Direnç</b>                                                                      |                   |                    | <b>Duraform PA</b>     | <b>Duraform GF</b>      |
| Alkalinelere, Hidrokarbonlara, Yakıcılara ve solventlere karşı kimyasal direnç gösterirler. |                   |                    |                        |                         |

### Somos 201

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi :* Kauçuk benzeri mekanik özellikleri bulunan bu hammaddenin malzeme maliyeti yüksek sınıfta değerlendirilmektedir. Stoklanabilirliği ve bulunabilirliği kötü olmasına rağmen küçük hacimli paketlerde ticari kullanıma sunulmuştur. Bu nedenle yüksek malzeme maliyeti yanı sıra nihai ürüne kattığı teknik özellikler sebebiyle tercih edilebilir düzeydedir. Somos 201 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.3’de görülmektedir. Malzeme Sınıfı: termoplastik elastomer toz

Çizelge 3.3. Somos 201 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 28, 29]

| <b>Toz Özellikleri</b>                                           | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 201</b> |
|------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| Yoğunluk                                                         | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D4164         | 0,58             |
| Ortalama Partikül Boyutu                                         | µm                | Optik Ölçüm        | 93               |
| Partikül Ölçü Aralığı - % 90                                     | µm                | Optik Ölçüm        | 23-190           |
| Spesifik Ağırlık – 20 °C                                         |                   | ASTM D792          | 0,91             |
| Erime Noktası                                                    | °C                | DSC                | 1,56             |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                                        | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 201</b> |
| Gerilme Modülü                                                   | MPa               | ASTM D638          | 15,5             |
| Kırılma Uzaması                                                  | %                 | ASTM D638          | 110              |
| % 5 Gerilmede Kırılma Uzaması Dayanımı                           | MPa               | ASTM D638          | 1,8              |
| % 10 Gerilmede Kırılma Uzaması Dayanımı                          | MPa               | ASTM D638          | 2,0              |
| Aşınma Dayanımı, CS-17 çark, 1kg yük                             | mg/1000           | ASTM D4060         | 520              |
| Aşınma Dayanımı, H-18 çark, 1kg yük                              | mg/1000           | ASTM D4060         | 870              |
| Basma Dayanımı, 23 °C, 25mm ID x 2mm kalınlık x 300 mm uzun boru | kPa               | ASTM D380          | 0                |
| Sertlik, 23 °C                                                   | shore             | ASTM D2240         | 74               |
| <b>Elektriksel Özellikler</b>                                    | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 201</b> |
| Hacimsel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V                            | ohm x cm          | ASTM D257-93       | 1,5E +13         |
| Yüzeysel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V                            | ohm x cm          | ASTM D257-93       | 1,9E +13         |
| Dielektrik Sabiti - 22 °C, %50 RV, 5V 1000Hz                     |                   | D150-95            | 2,9              |

### Laser Form, ST 100

*Malzeme Sınıfı* : Paslanmaz çelik toz

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Malzeme maliyeti yüksektir. İnşa aşaması uzun süre gerektirmektedir. Bu nedenle enerji sarfıyatı artarak toplam maliyeti arttırmaktadır. ST100 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.4’ te görülmektedir.

Çizelge 3.4. ST 100 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27]

| <b>Toz Özellikleri</b>                                  | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>ST 100</b> |
|---------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Yoğunluk, 23 °C                                         | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D792          | 7,7           |
| <b>Termal Özellikler</b>                                | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>ST 100</b> |
| Termal İletkenlik, 100 °C                               | W/m/°K            | ASTM E457          | 49            |
| Termal İletkenlik, 100 °C                               | W/m/°K            | ASTM E457          | 56            |
| Termal Genleşme Katsayısı x10 <sup>-6</sup> , 51-150 °C | m/m/°C            | ASTM E831          | 12,4          |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                               | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>ST 100</b> |
| Ürün Gerilme Dayanımı, % 0,2                            | MPa               | ASTM E8            | 305           |
| Dayanıklılık                                            | MPa               | ASTM E8            | 510           |
| Uzama                                                   | %                 | ASTM E8            | 10            |
| Yaşlanma Modülü                                         | GPa               | ASTM E8            | 137           |
| Basmaya karşı Eğilme Dayanımı, % 0,2                    | MPa               | ASTM E9            | 317           |
| Sertlik, Rockwell “B” , filtre edilmiş                  | -                 | ASTM E18           | 87            |
| Sertlik, Rockwell “B” , işlenmiş                        | -                 | ASTM E18           | 79            |

Bu inşa malzemesinin teknik özellikleri, termal ve mekanik özellikler açısından incelendiğinde, nispeten elverişli değerlere sahip olduğu görülmektedir.

### Cast Form, Polistiren (Polystyrene – PS)

*Malzeme Sınıfı* : Termoplastik toz, Polistiren

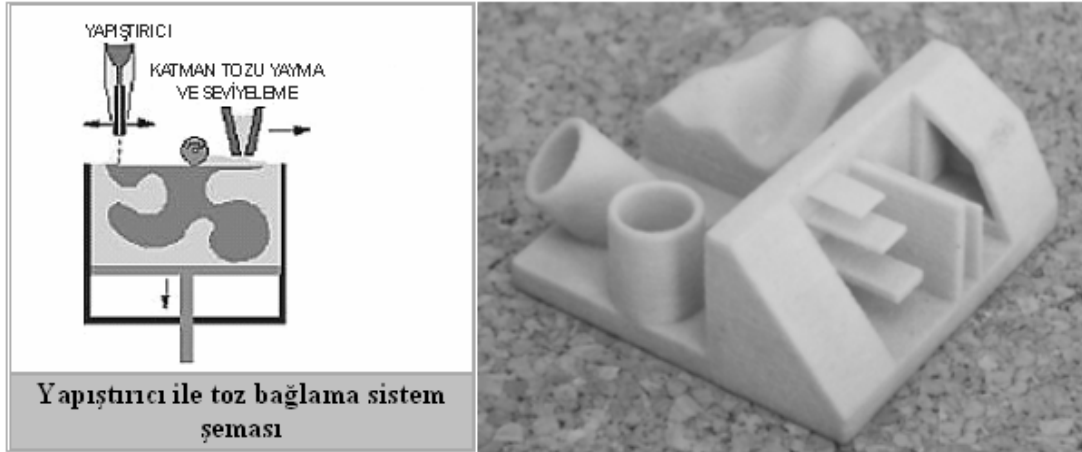
*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : İnşa sonrası işlemler sürecinde kolay temizlenebilir olması nedeni ile üretim zamanında olumlu etki gösterir. Malzeme maliyeti teknik özellikleri nedeni ile yüksektir. Polistiren inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.5’ de görülmektedir.

Çizelge 3.5. Polistiren inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 29]

| <b>Toz Özellikleri</b>                   | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Filtre Edilmiş PS</b> |
|------------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|
| Yoğunluk                                 | g/cm <sup>3</sup> | ASTM D4164         | 0,46                     |
| Ortalama Partikül Boyutu                 | µm                | Optik Ölçüm        | 62                       |
| Partikül Ölçü Aralığı - % 90             | µm                | Optik Ölçüm        | 25 – 106                 |
| Spesifik Ağırlık – 20 °C                 |                   | ASTM D792          | 0,86                     |
| Nem Alma Oranı – 23 °C %65 RH.           | %                 | ASTM D570          | 0,06                     |
| Atık Toz İçeriği                         | %                 | ASTM D482          | 0,02                     |
| <b>Termal Özellikler</b>                 | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Filtre Edilmiş PS</b> |
| Akma Noktası Sıcaklığı, Polistiren       | °C                | ASTM D3418         | 89                       |
| Erime Noktası                            | °C                | DSC                | <63                      |
| 0,45 MPa Basınç Altında Erime Noktası    | °C                | ASTM D648          | 33                       |
| 1,82 Mpa Basınç Altında Erime Noktası    | °C                | ASTM D648          | 40                       |
| Alev Alma Sıcaklığı, Polistiren          | °C                |                    | 300                      |
| Alev Alma Sıcaklığı, Parafin             | °C                |                    | >200                     |
| Otomatik Alev Alma Sıcaklığı, Polistiren | °C                |                    | 410                      |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                | <b>Birim</b>      | <b>Test Metodu</b> | <b>Filtre Edilmiş PS</b> |
| Gerilme Dayanımı                         | kPa               | ASTM D638          | 2840                     |
| Gerilme Modülü                           | MPa               | ASTM D638          | 1604                     |
| Çarpma Dayanımı – Çentikli               | J/m               | ASTM D256          | <11                      |
| Çarpma Dayanımı – Çentiksiz              | J/m               | ASTM D256          | 14                       |

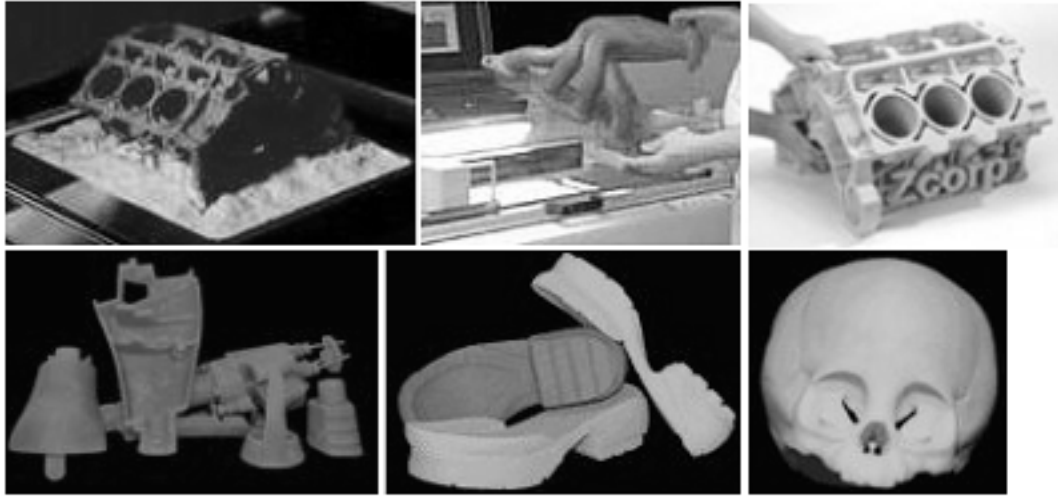
### 3.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği

Bu teknik, toz formundaki hammadde üzerine çok ağızlı bir memeden yapıştırıcı püskürtülerek tozların birbirine bağlanması prensibi ile çalışır. Merdane aracılığı ile belirli kalınlıkta toz hammadde katman halinde platform üzerine yayılır. Yatay düzlemde hareket edebilen çok ağızlı meme inşa öncesi hazırlık işlemlerinde hazırlanmış dataya uygun olan bölgelere yapıştırıcı püskürtür. Platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek çevrim tekrarlanır. İnşa aşaması tamamlandığında parça cihaz platformundan alınarak destek yapısı görevi gören tozlar fırça veya vakumlu emici ile parça üzerinden uzaklaştırılarak temizlenir. Şekil 3.7' de yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen deney modeli görülmektedir. Nişasta tabanlı tozlar, alçı ve kompozit tabanlı tozlar, elastomer tozlar bu teknikte kullanılan ana inşa malzemelerini oluşturmaktadır. Kullanılan malzeme ve uygulamaya göre, infiltrasyon ve sinterleme gibi değişik ek işlemler de yapılabilir. Ayrıca bu teknik, inşa edilen prototiplerin değişik renklerde üretilmesine de imkan sağlar.



Şekil 3.7. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model [26]

Resim 3.3'de yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile farklı renklere sahip tozlar kullanılarak inşa edilmiş modeller ve parça örnekleri görülmektedir. Bu parçalar değişik renklere sahip olabilmektedir.



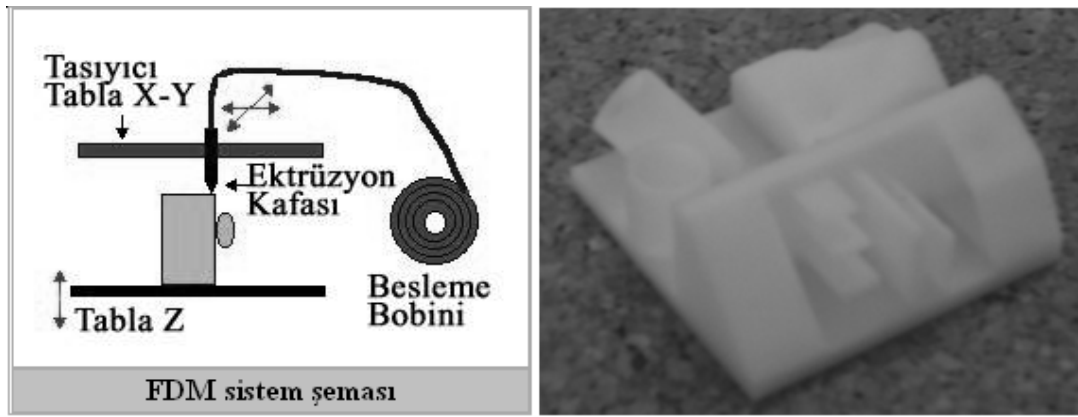
Resim 3.3. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile inşa edilen örnek parçalar [3, 26]

### 3.2.3. Sıvayarak harç yığma tekniği

Sıvayarak harç yığma tekniğinin literatürdeki ingilizce adı Fused Deposition Modeling (FDM) olarak kullanılmaktadır. Bu teknikte, bobin üzerine sarılı olarak cihaza yüklenebilen tel formunda hammaddeler kullanılmaktadır. Hammadde ekstrüzyon başlığında ısıtılarak sıvı veya macun kıvamında 0,3 mm çapında memeden sıkılma suretiyle çıkarılıp gerekli noktara sıvanır. Sıvama işlemi platformun katman kalınlığı kadar aşağı inmesi ile yeniden başlar ve parça inşa edilene kadar bu çevrim devam eder. Sıvayarak harç yığma tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli Şekil 3.8' de görülmektedir.

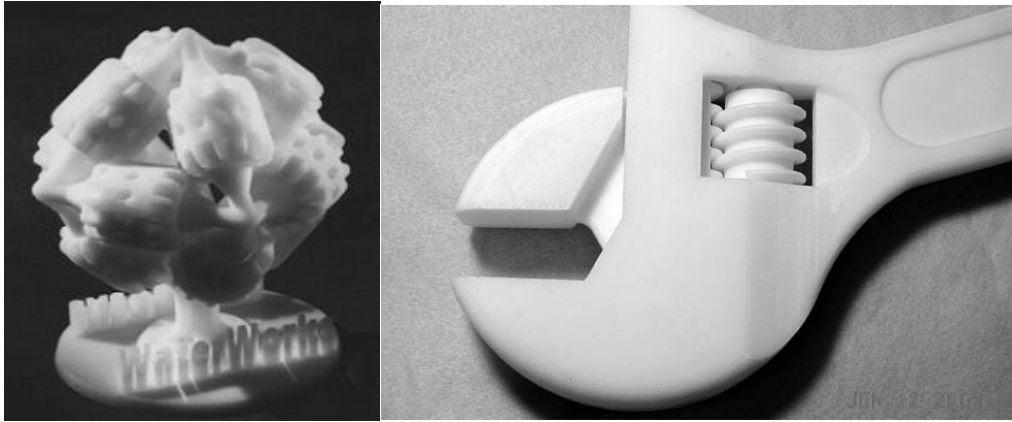
Sıvayarak harç yığma tekniği inşa aşamasında, termoplastik malzeme katılma noktasının biraz üzerindeki bir sıcaklıktadır. Bu sıcaklık ve ekstrüzyon memesine malzemenin pompalanması ile kontrol edilir. Her tabaka, bir önceki tabaka ile eritilmek suretiyle yapıştırılır. Plastik liflerin beslenme hızları monitörden izlenebilmektedir. Bu sayede, herhangi bir verilen zamandaki ekstrüzyon edilmiş malzeme miktarı kontrol edilebilir. Her tabakanın kalınlığı malzemenin fiziksel özelliklerine, hareketli kafanın hızına, ekstrüzyon basıncına ve meme çıkış çaplarına göre tanımlanmaktadır. Tabaka kalınlığı, hareketli kafaya göre tipik olarak 0,1 mm ile 0,5 mm arasında değişmektedir. Yol genişliği ise 0,25 mm ile 6 mm arasında

değişmektedir. Rulolara sarılı termoplastik malzeme lifi yaklaşık 1,78 mm çapındadır. Sıvayarak harç yığma tekniğinde, hassas döküm mumu ve polyamidin (termo plastik elastomerler) yanısıra, ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) gibi erime sıcaklığı yüksek, zehirsiz mühendislik plastik lifleri de rahatlıkla inşa malzemesi olarak kullanılabilir.



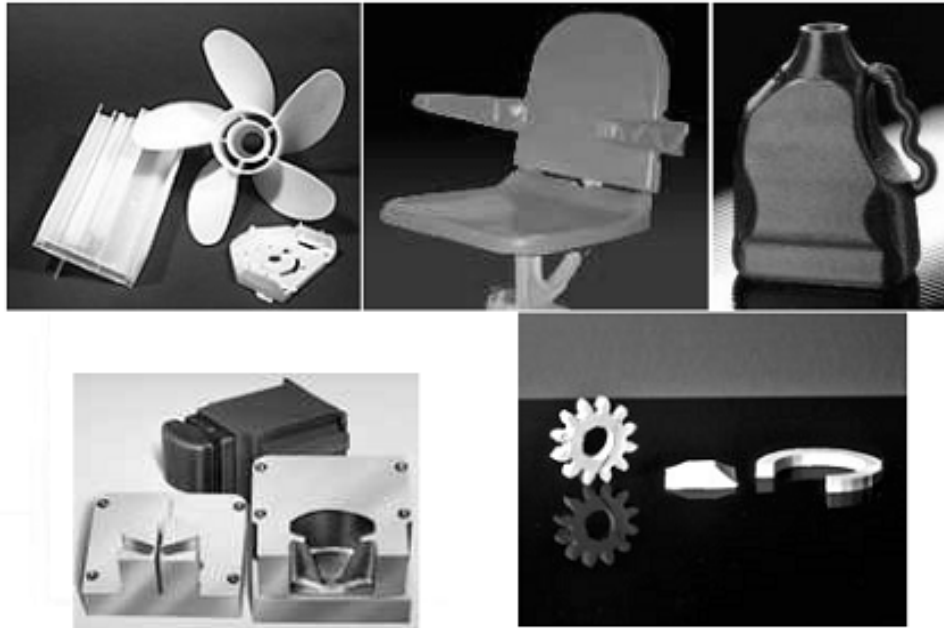
Şekil 3.8. Sıvayarak harç yığma tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model [26]

İnşa aşamasında sıvı hammadde, yerçekimi gibi fiziksel etkiler sebebi ile, hedeflenen modeli oluşturmakta hatalar ile karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, inşa hammaddesi haricinde farklı bir hammadde kullanılarak destek yapısı, söz konusu hatalar ile karşılaşmamak amacı ile, ayrıca inşa edilir. Destek yapıları inşa aşamasında parça inşası ile eş zamanlı olarak inşa edilir. Sıvayarak harç yığma tekniğinde destek yapısı hammaddesi olarak kolay kırılabilir destek sistemi “BASS – Break Away Support System” olarak adlandırılan, iş parçasını oluşturan ana hammaddeden kolayca kırılabilen hammadde kullanılabilir. Bir diğer destek yapısı hammaddesi ise kimyasal yapısı nedeni ile su içerisinde çözünebilen (Water Works) malzemelerdir. Bu malzeme kullanılarak manuel olarak ulaşması imkansız, küçük boyutlu bölgeler rahatlıkla temizlenebilir. Ayrıca bu malzeme kullanıldığında inşa sonrası işlemler aşamasında zaman tasarrufu sağlamaktadır. Resim 3.4' de sıvayarak harç yığma tekniği ile inşa edilmiş örnek parça görülmektedir.



Resim 3.4. Sıvayarak harç yığma tekniği ile “Water Works” destek malzemesi kullanılarak inşa edilmiş örnek parça [3, 26]

Resim 3.5’ te sıvayarak harç yığma tekniği ile inşa edilmiş çeşitli özellik ve yapılarda modeller ve parça örnekleri görülmektedir.



Resim 3.5. Sıvayarak harç yığma tekniği ile inşa edilen örnek parçalar [3, 26]

Sıvayarak harç yığma tekniğinde geleneksel olarak ABS inşa malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ABS P400 inşa malzemesi kullanılmıştır. Bir ABS türü olan ABS P400 inşa malzemesinin teknik özellikleri ile malzemenin üretim zamanı ve maliyet açısından etkileri aşağıda incelenmiştir.

### ABS P400

*Malzeme Sınıfı : ABS Plastik*

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi :* Malzeme maliyeti düşük sınıfta değerlendirilmektedir ancak destek yapısı için ikinci bir malzeme kullanıldığından toplam malzeme maliyeti artmaktadır. Destek yapılarının inşa aşamasına dahil olması üretim zamanını arttırırken maliyeti de arttırıcı etkide bulunur. Çizelge 3.6' da ABS P400 inşa malzemesinin teknik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.6. ABS P400 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 31]

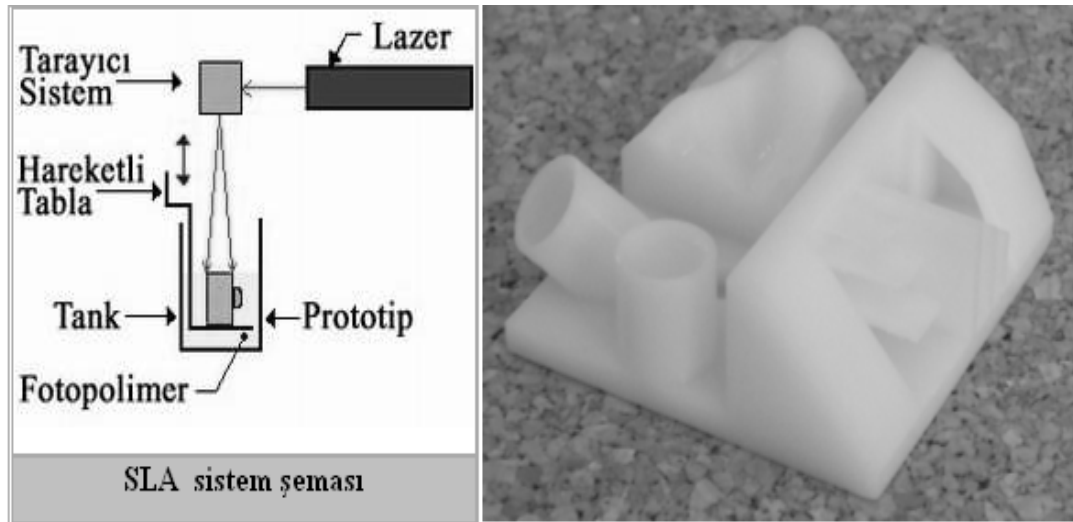
| Termal Özellikler           | Birim   | ABS P400 |
|-----------------------------|---------|----------|
| Ergime Sıcaklığı            | °C      | 95       |
| Mekanik Özellikler          | Birim   | ABS P400 |
| Gerilme Dayanımı            | MPa     | 34,45    |
| Gerilme Modülü              | MPa     | 2480     |
| Elastikiyet Dayanımı        | MPa     | 65       |
| Elastikiyet Modülü          | MPa     | 2618     |
| Çarpma Dayanımı – Çentikli  | J/m     | 1282     |
| Çarpma Dayanımı – Çentiksiz | J/m     | 107      |
| Sertlik                     | Shore D | 78       |
| Elastikiyet Kabiliyeti      | %       | >10      |

#### **3.2.4. Tarayarak ışıkla kür tekniği**

Tarayarak ışıkla kür tekniği ingilizce literatürde Stereolithography (SLA) adı ile yer almaktadır. 1986 yılında kurulan 3D System firmasının 1988 yılında ticari kullanıma sunması ile birlikte ilk defa ticari kullanıma sunulmuş HPÜ teknolojisi olmuştur. Bu teknik, fotopolimer esaslı sıvı haldeki malzemenin lazer ışını ile kürlenerek katı hale getirilmesi prensibi ile inşa aşamasını gerçekleştirir. Kullanılan sıvı polimer, mor ötesi (UV- Ultraviolet) ışık altında kimyasal tepkime göstererek katı hale dönüşen bir fotopolimer malzemedir. Lazer ışını bilgisayar desteği ile inşa hazırlık aşamasında

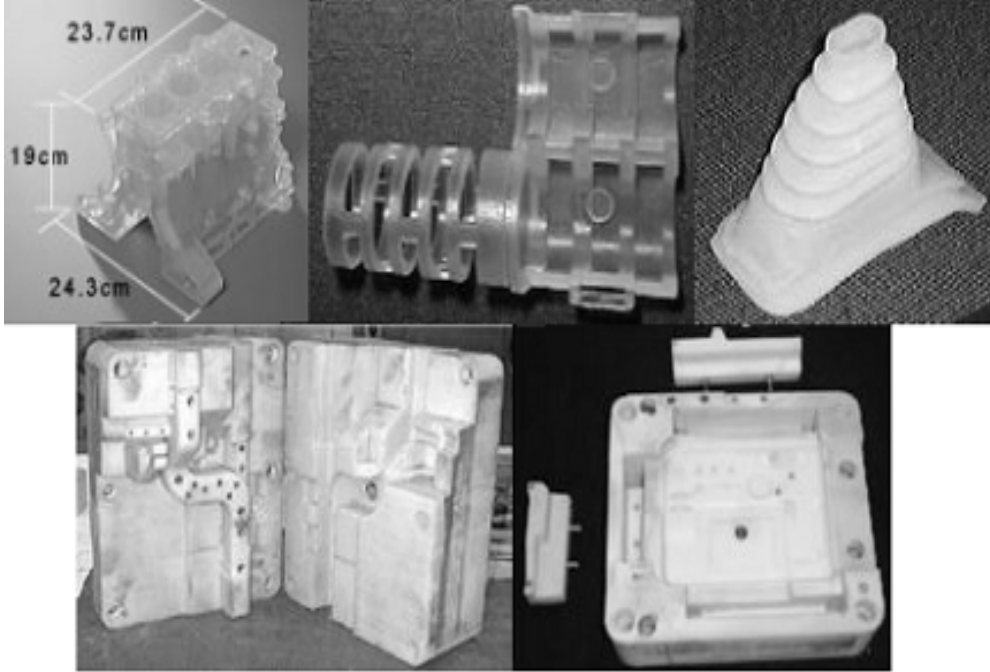
belirlenmiş bölgelere noktasal olarak uygulanır ve sıvı malzemenin üst bölgeleri kürlenerek katılaştırılır. Katman inşası tamamlandığında platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bir kanat yardımı ile yeni bir kat sıvı polimer yayılır. Malzemenin yapışkan özelliği sayesinde katmanlar birbirine yapışırlar. Parça inşası tamamlanıncaya kadar çevrim devam ettirilir. İnşa hazırlık aşamasında, önceden tasarlanmış destek yapıları tespit edilerek inşa aşamasında bu yapılar dahil edilmektedir. Bu destek yapıları inşa aşaması tamamlandığında cihazdan alınan parça üzerinden kırma, koparma, kesme yolu ile temizlenir. İnşa aşamasında uygulanan kür derecesi çoğunlukla yeterli görülmediğinden parça UV lamba altında ilaveten bir süre daha kürlenir.

Tarayarak ışıqla kür tekniğı ile çalışan HPÜ cihazlarında küçük farklılıklar olsa bile tüm cihazlar aynı prensipte çalışmaktadır. Şekil 3.9' da tarayarak ışıqla kür tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli görölmektedir.



Şekil 3.9. Tarayarak ışıqla kür tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen model [26]

Resim 3.6’ da tarayarak ışıkla kür tekniği ile farklı teknik özelliklere sahip inşa malzemeleri ile inşa edilmiş modeller, parça ve kalıp örnekleri görülmektedir.



Resim 3.6. Tarayarak ışıkla kür tekniği ile üretilmiş örnek parçalar [3, 26]

Tarayarak ışıkla kür tekniğinde fotopolimer inşa malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Somos 14120 White inşa malzemesi kullanılmıştır. Somos 14120 White ve diğer inşa malzemelerinin teknik özellikleri ile malzemenin üretim zamanı ve maliyet açısından etkileri aşağıda incelenmiştir.

#### Somos 14120 White

*Malzeme Sınıfı* : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Malzemenin teknik özellikleri alışılmış plastiklere benzese bile malzeme maliyeti oldukça yüksektir. Katman kalınlığındaki küçültülebilir toleranslar sayesinde üretilebilirlik iyileşirken katman sayısının artması nedeni ile üretim zamanı oldukça artar. Somos 14120 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.7’ de görülmektedir.

Çizelge 3.7. Somos 14120 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 28, 32]

| <b>Termal Özellikler</b>                                     | <b>Birim</b> | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 14120</b> |
|--------------------------------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------|
| Akma Noktası Sıcaklığı                                       | °C           | ASTM E1545-00      | 44                 |
| 0,46 MPa Basınç Altında Erime Noktası                        | °C           | ASTM D648-98c      | 53                 |
| 1,82 MPa Basınç Altında Erime Noktası                        | °C           | ASTM D648-98c      | 48                 |
| -40 °C - 0 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim  | µm/m- °C     | ASTM E381-00       | 67                 |
| 0 °C - 50 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim   | µm/m- °C     | ASTM E381-00       | 93                 |
| 50 °C - 100 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim | µm/m- °C     | ASTM E381-00       | 156                |
| 100 °C -150 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim | µm/m- °C     | ASTM E381-00       | 180                |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                                    | <b>Birim</b> | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 14120</b> |
| Gerilme Dayanımı                                             | MPa          | ASTM D638M         | 45,7               |
| Kopma Uzaması                                                | %            | ASTM D638 M        | 7,9                |
| Eğilme Uzaması                                               | %            | ASTM D638 M        | 3,5                |
| Elastikiyet Modülü                                           | MPa          | ASTM D638M         | 2460               |
| Poisson Oranı                                                |              | ASTM D638M         | 0,23               |
| Bükülme Dayanımı                                             | MPa          | ASTM D790M         | 68,9               |
| Bükülme Modülü                                               | MPa          | ASTM D790M         | 2250               |
| IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli                               | J/m          | ASTM D256A         | 23,5               |
| Sertlik                                                      | Shore D      | ASTM D2240         | 81                 |
| <b>Mekanik Özellikler</b>                                    | <b>Birim</b> | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 14120</b> |
| Yırtılma Dayanımı                                            | N/m          | ASTM D1004         | 123000             |
| Nem Alma Oranı                                               | %            | ASTM D570-98       | 0,24               |
| <b>Elektriksel Özellikler</b>                                | <b>Birim</b> | <b>Test Metodu</b> | <b>Somos 14120</b> |
| Dielektrik Sabiti, 60 Hz                                     |              | D150-98            | 3,9                |
| Dielektrik Sabiti, 1 KHz                                     |              | D150-98            | 3,8                |
| Dielektrik Sabiti, 1 MHz                                     |              | D150-98            | 3,5                |
| Dielektrik Dayanım                                           | kV/mm        | D149-97a           | 14,6               |

### Somos 9120

*Malzeme Sınıfı* : Düşük viskoziteli sıvı epoksi fotopolimer

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Uzun üretim zamanı ve yüksek malzeme maliyeti sergilemektedir. Hedeflenen üretilebilirlik kriterleri açısından tercih edilebilmektedir.

Somos 9120 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.8’ de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Somos 9120 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 28, 32]

| Karakteristik Özellikler       | Birim   | Test Metodu | Somos 9120  |
|--------------------------------|---------|-------------|-------------|
| Akma Noktası Sıcaklığı         | °C      | DMA E       | 52 - 61     |
| Young Modülü                   | MPa     | ASTM D638M  | 1227 - 1462 |
| Eğilme Gerilme Dayanımı        | MPa     | ASTM D638M  | 30 - 32     |
| Kopma Uzaması                  | %       | ASTM D638   | 15 – 25     |
| Karakteristik Özellikler       | Birim   | Test Metodu | Somos 9120  |
| Bükülme Dayanımı               | MPa     | ASTM D790   | 41 - 46     |
| Bükülme Modülü                 | MPa     | ASTM D790   | 1310 - 1455 |
| IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli | J/m     | ASTM D256A  | 48 - 53     |
| Sertlik                        | Shore D | ASTM D2240  | 80 -82      |

### RenShape SL7560

*Malzeme Sınıfı* : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Dayanıklı parçaların inşa edilmesinde tercih edilen bir malzemedir. Diğer taraftan ışıkla kür tekniği malzemeleri gibi yüksek üretim zamanı ve maliyet sergilemektedir. RenShape SL7560 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.9’ da verilmiştir.

Çizelge 3.9. RenShape SL7560 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 32]

| Karakteristik Özellikler       | Birim             | Test Metodu | SL7560      |
|--------------------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Akma Noktası Sıcaklığı         | °C                | DMA E       | 60          |
| Sapma Sıcaklığı                | °C                | ASTM D648   | 56 - 60     |
| Gerilme Dayanımı               | MPa               | ASTM D638   | 42 - 62     |
| Gerilme Modülü                 | MPa               | ASTM D638   | 2400 - 2600 |
| Kopma Uzaması                  | %                 | ASTM D638   | 6 - 15      |
| Bükülme Dayanımı               | MPa               | ASTM D790   | 83 – 104    |
| IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli | J/m               | ASTM D256   | 28 - 44     |
| Sertlik                        | Shore D           | ASTM D2240  | 86          |
| Yoğunluk                       | g/cm <sup>3</sup> |             | 1,22        |

RenShape SL5510

*Malzeme Sınıfı* : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

*Üretim zamanı ve Maliyet etkisi* : Özellikle ölçü tamlığı gerektiren parçaların inşa edilmesinde tercih edilmektedir. Tarayarak ışıkla kür tekniğinde kullanılan diğer malzemeler gibi yüksek üretim zamanı ve maliyet sergilemektedir. RenShape SL5510 inşa malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 3.10’ da verilmiştir.

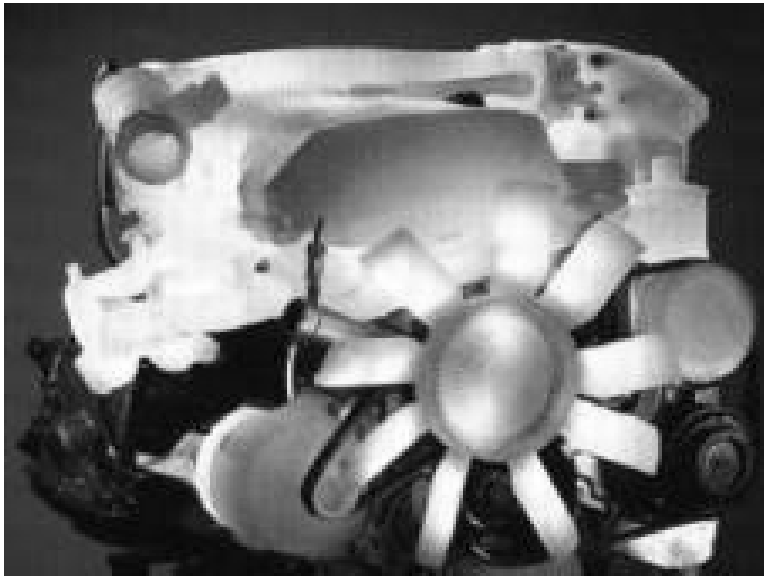
Çizelge 3.10. RenShape SL5510 inşa malzemesinin teknik özellikleri [27, 32]

| Karakteristik Özellikler       | Birim             | Test Metodu | SL5510  |
|--------------------------------|-------------------|-------------|---------|
| Akma Noktası Sıcaklığı         | °C                | DMA E       | 60      |
| Sapma Sıcaklığı                | °C                | ASTM D648   | 53 - 62 |
| Gerilme Dayanımı               | MPa               | ASTM D638   | 77      |
| Gerilme Modülü                 | MPa               | ASTM D638   | 3296    |
| Kopma Uzaması                  | %                 | ASTM D638   | 5,4     |
| Bükülme Dayanımı               | MPa               | ASTM D790   | 99      |
| IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli | J/m               | ASTM D256   | 27      |
| Sertlik                        | Shore D           | ASTM D2240  | 86      |
| Yoğunluk                       | g/cm <sup>3</sup> |             | 1,23    |

### 3.3. Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri Kullanım Alanları

#### 3.3.1. Kavramsal modelleme uygulamaları

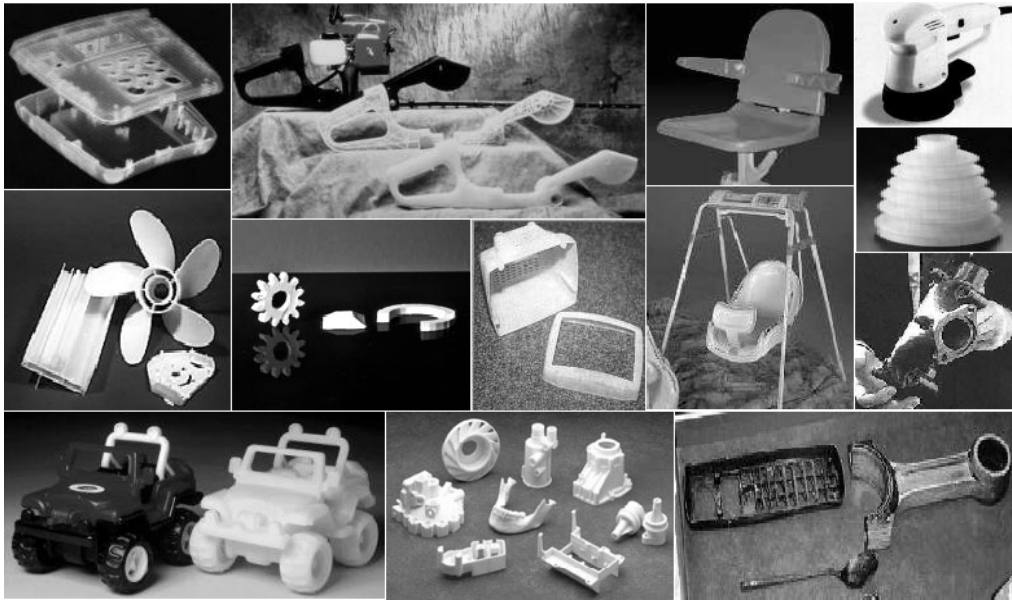
Endüstriyel tasarım ve ürün modelleme çalışmalarında, karşılaşılabilecek hataların en aza indirgenmesi için, ürüne ait modeli hızlı bir şekilde prototiplenmesi söz konusu olmaktadır. Tasarım sonrası gerçekleştirilen bu modellemeye *Kavramsal Modelleme* (conceptual modeling) veya *Konsept Modelleme* (concept modeling) denilmektedir. Ar-Ge ve tasarım çalışmalarının ilk safhalarında, ticari işletme içerisinde tasarımcı, imalat sorumlusu, pazarlama ekibi gibi personel arasındaki haberleşme ve ortak çalışmaları kolaylaştırarak ürün geliştirme çalışmalarını daha verimli hale getirmek için kavramsal modeller sıklıkla tercih edilmektedir. Bu amaca hizmet edecek prototiplerin kısa üretim zamanı ile hızlı temin edilebilir ve düşük maliyetli olması beklenmektedir. Resim 3.7’ de tarayarak ışıkla kür tekniği ile parçaları inşa edilerek montajı tamamlanmış yeni tasarlanan bir motor görülmektedir. Parçalarının inşa işlemi gerçekleştirilen bu konsept model motor sayesinde, ürün geliştirme çalışmaları esnasında tasarım, imalat, kalite gibi işletme birimleri kolaylıkla ortak çalışmalarda bulunabilmektedirler.



Resim 3.7. HPÜ Teknolojisiyle inşa edilmiş motor modeli [2, 26]

### 3.3.2. Fonksiyonel prototipleme uygulamaları

Ürün geliştirme çalışmaları dahilinde, prototip ihtiyaçları HPÜ teknolojileri kullanılarak karşılanabilmektedir. HPÜ cihazları kullanarak prototip inşa etmek suretiyle bu ihtiyacın karşılanması durumunda nispeten hızlı üretim süresi nedeni ile ürün geliştirme süreçlerinde sonuca çabuk ulaşılması sağlanır. Böylece ticari işletmeler yeni ürünlerini pazara daha kısa sürede sunabilmektedirler. Resim 3.8’ de farklı endüstrilere ait fonksiyonel modellerin farklı HPÜ teknikleri ile elde edilmiş prototipleri görülmektedir. Buradan da anlaşılabileceği üzere HPÜ sistemleri günümüz endüstrisinin birçok alanında başarı ile uygulanabilmektedir.



Resim 3.8. Farklı HPÜ teknikleri ile inşa edilmiş fonksiyonel prototipler [3, 26]

Resim 3.9’ da HPÜ tekniklerinden olan tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilmiş Porshe firmasına ait motor prototipi görülmektedir. Porshe firması yeni geliştirdiği bu motorun silindir başlıkları soğutma performansını test etmek için prototip imal etmiştir. İnşa malzemesi özelliklerinden dolayı prototip şeffaf olduğu için soğutma sıvısına katılan hava kabarcıkları vasıtasıyla sıvının akışı başarıyla gözlenebilmiştir. Böylece ürün geliştirme süreci, hataya meydan vermeden, süreç işlemlerinin tekrarlanmasına gerek kalmadan, kısa sürede ve düşük maliyetle sonuçlandırılmıştır.

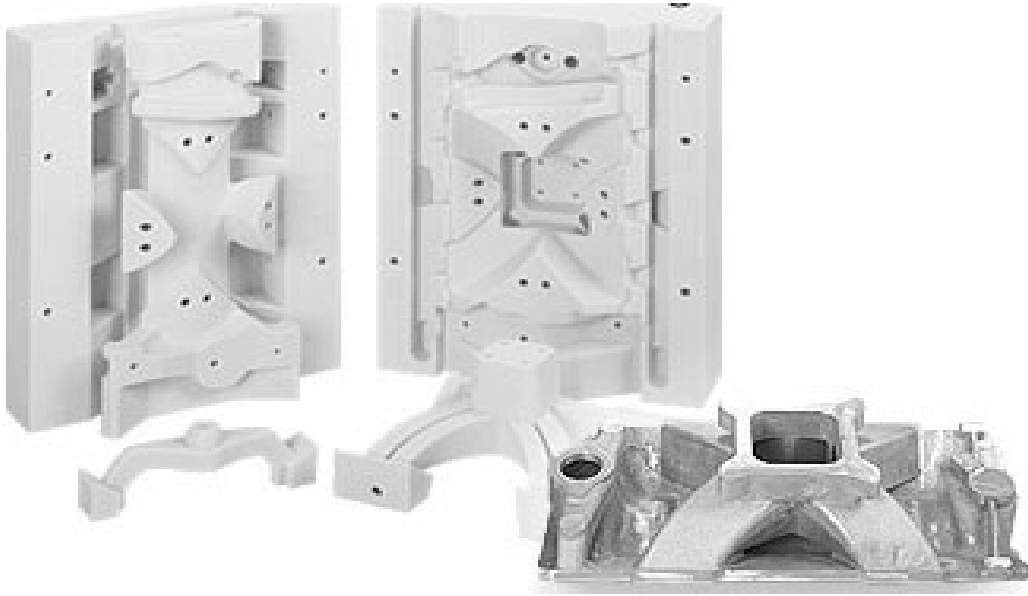


Resim 3.9. Porshe firması tarafından geliştirilen bir motora ait HPÜ prototipi [3, 26]

### 3.3.3. Doğrudan döküm kalıbı üretimi

Döküm kalıbı ve maçalarının üretimi için, HPÜ teknikleri içerisinde yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile çalışan Z Corpration firmasının geliştirdiği uygulama ile başarılı sonuçlar almak mümkündür [26]. Alçı-seramik karışımı toz formda bir çeşit inşa malzemesi kullanılarak döküm kalıbı ve maçaları doğrudan imal edilebilir. ZCast500 adındaki bu inşa malzemesi ile inşa edilen kalıplara alüminyum, çinko, magnezyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin dökümü gerçekleştirilebilmektedir.

Resim 3.10' da ZCast prosesi ve ZCast500 toz inşa malzemesi kullanılarak elde edilmiş bir döküm kalıbı, kalıp maçası ve bu kalıptan dökülmüş alüminyum bir parça görülmektedir.

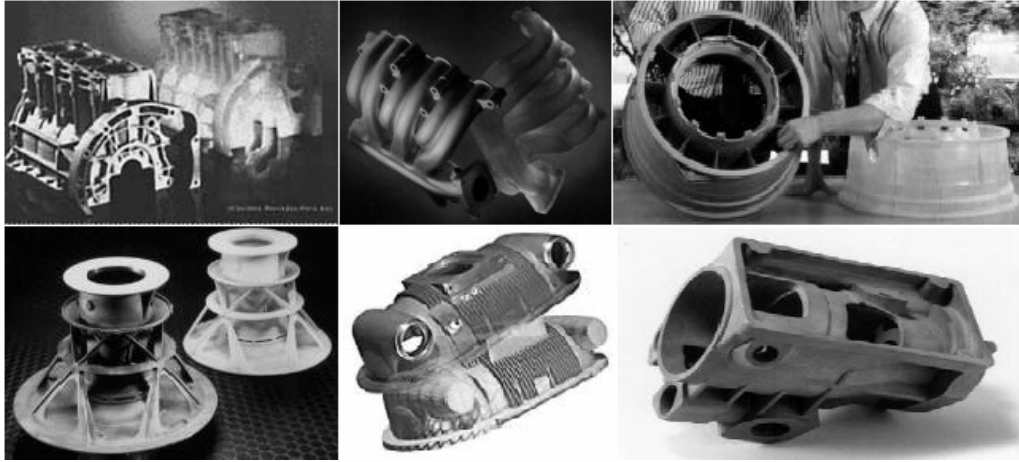


Resim 3.10. Z Cast prosesi ile elde edilmiş döküm kalıbı [3, 26]

#### 3.3.4. Hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretimi

Hassas döküm tekniğinden yararlanılarak, HPÜ teknikleri ile elde edilen bir çok modelin, hassas döküm tekniğine uygun malzemeler kullanılarak metal prototiplere veya asıl parçalara dönüşümü ile üretimi gerçekleştirilebilir.

Resim 3.11’ de Mercedes’e ait bir motor gövdesi prototipi ve bu prototip kullanılarak hassas döküm tekniği ile imal edilmiş metal motor gövdesi, Ford firması için geliştirilen tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilmiş prototip ve bu prototip kullanılarak hassas döküm tekniği ile A356-T6 alüminyum malzemeden dökülmüş bir motor hava giriş manifoldu, büyük boy bir jet parçası prototipi ve dökümü, hassas döküm ile üretilmiş bir dişli kutusu ve seramik kalıp kullanılarak imal edilen hassas döküm parçaları görülmektedir.



Resim 3.11. Hassas döküm tekniği ile üretilen metal parça ve prototipler [3, 26]

### 3.3.5. Analiz ve test uygulamaları

Mühendislik çalışmalarında gerçekleştirilen çeşitli test ve analiz uygulamaları bulunmaktadır. HPÜ teknolojileri ile inşa edilmiş prototipler, söz konusu test ve analizlerin uygulama koşullarına izin veren fiziksel, boyutsal gibi teknik özellikleri taşıyorsa, bu test ve analizlerde kullanılabilirler. Bu kullanım alanı sayesinde test ve analiz prosedürleri hızlandırılmış olmaktadır [26].

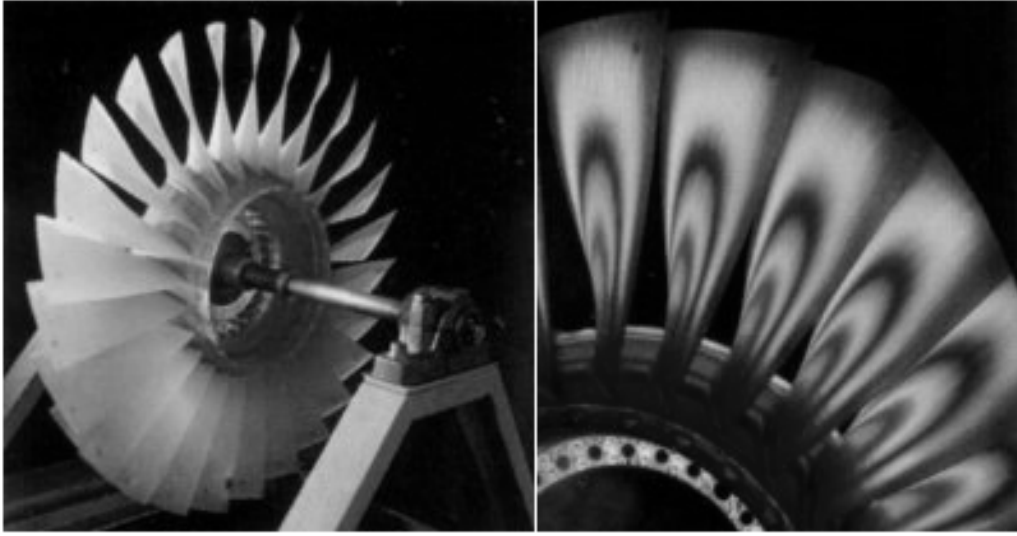
Tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilen modeller şeffaf olabildikleri için foto elastik gerilim analizi yönteminde kullanılmaya müsaittirler. Örneğin bir Alman otomobil üreticisi yeni geliştirdiği bir piston kolunu bu teknikle inşa edip polarize ışık altında gerilim dağılımını başarıyla test etmiştir. Bu sayede talaşlı imalat ile şeffaf bir plastikten model imalatına gerek kalmamıştır.

Optik gerilim analizi tekniklerinde kullanılacak modeller optik özelliklere sahip şeffaf fotopolimer reçinelerle hızlı, kolay ve ucuz bir şekilde doğrudan imal edilebilmektedir. Fransız uçak motoru tasarım ve geliştirme grubu Snecma (Societe Nationale d'Etude et Construction de Moteurs d'Aviation) 1992 yılında fotopolimer reçine üreticisi Ciba-Geigy ile epoksi reçinelerinin optik gerilim analizi tekniklerinde uygulanması için işbirliğine başlamışlardır. “Allied Signal Engines” isimli firmada

üretilmesi düşünülen yeni bir jet motoruna ait metal türbin kanatlarının büyük ölçekli modelleri tarayarak ışıkla kür tekniği ile üretilmiş ve titreşim test cihazına bağlanarak dinamik testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Resim 3.12' de soldaki resimde görülen 70 cm çapındaki türbin rotor ve kanat modeli 9 parça halinde tarayarak ışıkla kür tekniği ile çalışan cihazda, CIBATOOL SL 5170 reçinesi kullanılarak imal edilmiş ve her parçanın inşası 30 saat sürmüştür. Parçaları birleştirip test için hazırlamak ise iki hafta sürmüştür. Toplam test projesi böylece 1 ayda tamamlanmıştır. Dokuz ay süren ve iki kat maliyeti olan eski teknikte ise öncelikle talaşlı imalatla modeller üretiliyor ve ardından silikon kalıplama ile şeffaf test parçaları üretiliyordu. Silikon kalıplama için modeller tarayarak ışıkla kür tekniği ile de imal edilebiliyordu ama modellerinin direkt testlerde kullanılabilir olması daha hızlı ve ucuz bir çözüm imkanı sunmuştur. Direkt model imalatı özellikle silikon kalıplama ile bile tek parça halinde üretilmesi çok zor, karmaşık yapıları parçaların üretilmesi ve testi için çok uygundur [26].

Resim 3.12' de sağdaki resimde ise, rüzgar tüneline yapılan testler sonrasında türbin kanatları üzerinde merkezkaç ve aerodinamik kuvvetlerden oluşan gerilimlerin dağılımı görülmektedir. Bunun için deneye, reçinenin "cam geçiş fazına" (glass transition phase) ulaşacağı yaklaşık 100°C sıcaklıktaki bir ortamda başlanır. Gerilim altında oluşan deformasyonların kalıcı olabilmesi için sıcaklık yavaşça düşürülür ve test tamamlanır. Daha sonra polarize bir ışık altında model incelendiğinde gerilim dağılımıyla orantılı oluşan gökkuşağı renkleri kolayca görüntülenebilir. Siyah bölgeler hiç gerilimin olmadığını, sık değişen parlak renklerin olduğu bölgeler yüksek gerilimi, yumuşak renk değişimi ise düşük gerilimi gösterir [26].

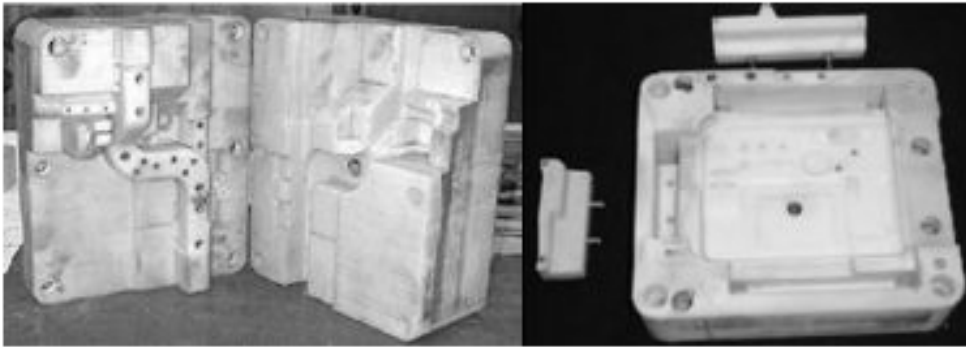


Resim 3.12. Jet türbini optik gerilim analizi uygulaması

### 3.3.6. Hızlı kalıp imalatı uygulamaları

Tasarlanmış plastik ve metal enjeksiyon kalıpları üretilmeden önce uygun HPÜ teknolojisi kullanılarak inşa edilebilir ve ilk baskı denemeleri daha hızlı ve düşük maliyetli olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Takviyeli fotopolimer reçine ile imal edilmiş kalıplar 100-200 adet ABS parçayı plastik enjeksiyon makinesinde üretebilecek dayanıma sahiptirler. Resim 3.13’ de sağda görülen maçalı kalıp SONY/Mavica dijital fotoğraf makinesi prototiplerini basmak için üretilmiştir.



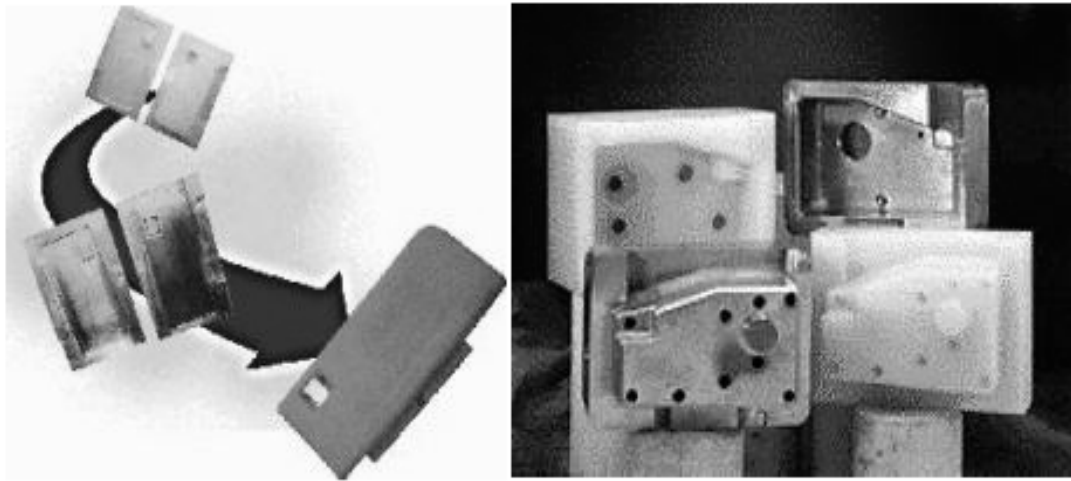
Resim 3.13. Takviyeli fotopolimer reçinesi ile imal edilmiş kalıplar

Resim 3.14’ de görülen tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilmiş modeller kullanılarak *hassas dökümle* imal edilmiş plastik enjeksiyon kalıpları Ford firması tarafından kullanılmıştır. Sarı olan parçalar *QuickCast* stiliyle üretilmiş fotopolimer modellerdir. Metal olanlar ise çelik döküm kalıp parçalarıdır.

Her ne kadar bu kalıp CNC tezgahlarla yapılmış kadar hassas ölçülerde olamasa da hızlı üretilebilmesi ve kaput altında kalan ve nispeten kaba plastik parçaların imal edilmesi için idealdir.

Bu tip uygulamalarda hassasiyeti korumak için döküm sırasındaki deformasyonları önceden tahmin ederek üretilen modelin tasarımını, hataları minimize edecek şekilde değiştirebilecek gelişmiş bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır.

Aksi halde en az birkaç adet deneme yanılma yapılması gerekebilir.



Resim 3.14. HPÜ prototipi kullanılarak hassas döküm ile imal edilmiş kalıplar

### 3.3.7. Doğrudan imalat uygulamaları

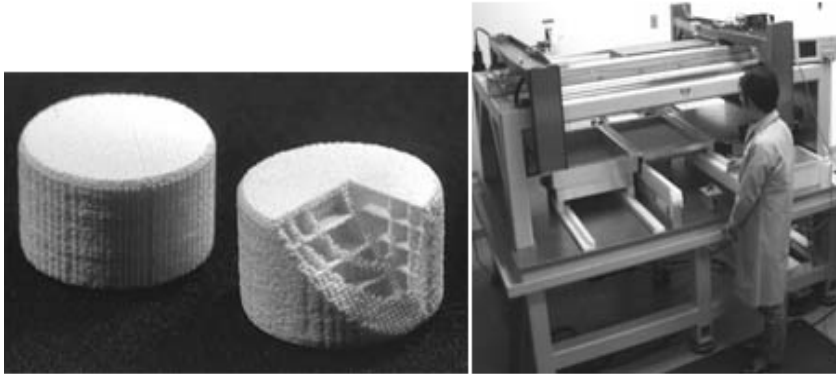
Üretim zamanı ve maliyet açısından bilinen seri üretim tekniklerine nispeten yavaş ve pahalı olduğundan HPÜ teknolojileri ile seri üretim yaygın tercih edilmemektedir. Klasik üretim tekniklerinin üretilebilirlik açısından yetersiz kaldığı, düşük üretim adetli özel üretimlerde HPÜ teknolojileri kullanılarak doğrudan üretim yapılması verimli olabilmektedir. Örneğin, özel amaçlı bir laboratuvar deney aletinin belli plastik parçalarının üretilmesi için HPÜ teknolojisi uygun sonuç verebilir.

Ticari olarak, HPÜ teknolojisinin doğrudan imalatta kullanıldığı en iyi örnek ABD’ndeki “Specific Surface” isimli bir firmanın ürettiği seramik filtrelerdir. Bilgisayar ile tasarlanan filtreler istenilen yoğunlukta ve geometride üretilebilmektedir. Bu filtreler klasik yöntemle imal edilenlere kıyasla 10 kat daha fazla performans gösterebilmektedirler (Resim 3.15).



Resim 3.15. Yüksek performanslı seramik filtreler

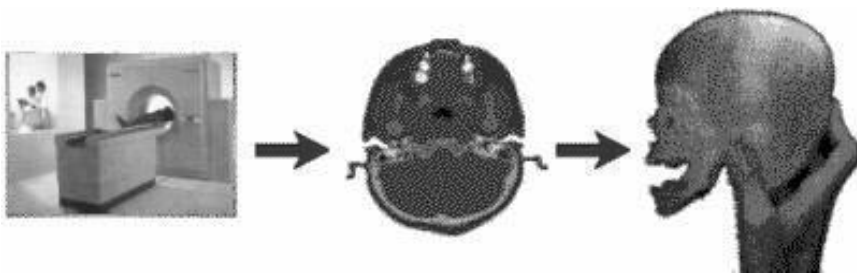
HPÜ teknolojilerinden faydalanan ve çeşitli ilaç tozları ve bağlayıcılar kullanan sistemler kullanılarak ilaç kapsüllerinin direkt imalatı mümkün olmaktadır (Resim 3.16).



Resim 3.16. HPÜ teknolojisi kullanılarak üretilen ilaç kapsülleri

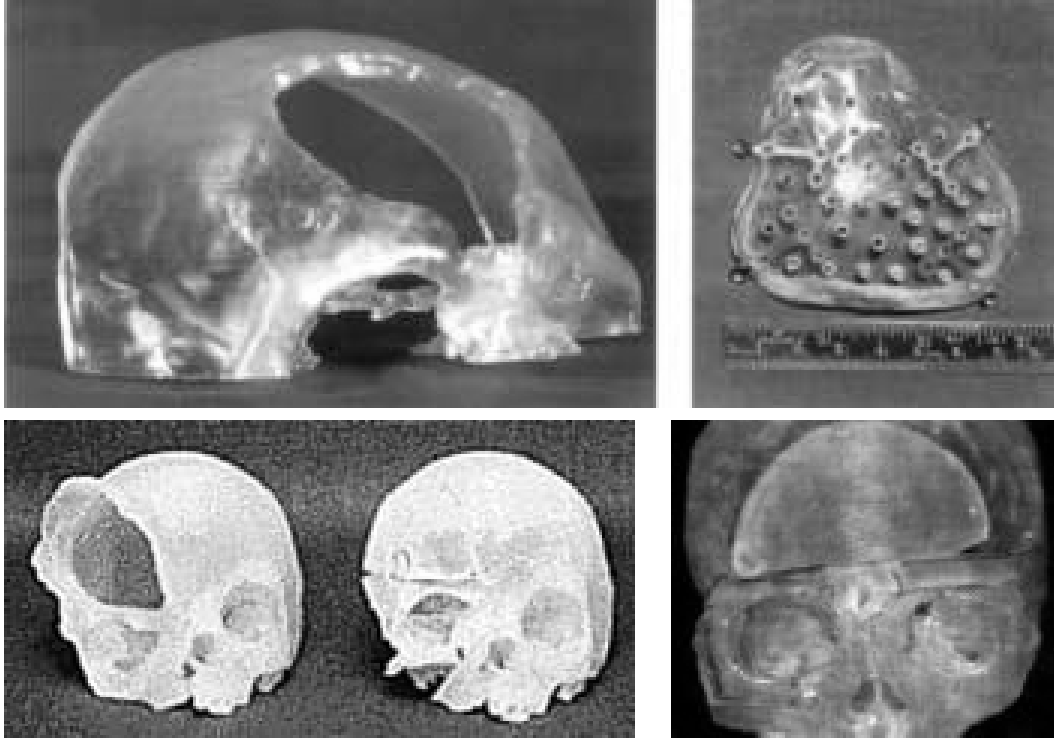
### 3.3.8. Medikal uygulamalar

İnsan vücudunda bulunan organ veya uzuvların BT (Bilgisayarlı Tomografi) veya MR (Manyetik Rezonans) cihazları ile üç boyutlu verisi elde edilir. Elde edilen üç boyutlu veri, bilgisayar yazılımları aracılığı ile uygun formatlara dönüştürülür. Böylece, organ veya insan uzuvları HPÜ cihazlarında inşa edilerek, cerrahi müdahaleye gerek kalmadan tedavi imkanı veya cerrahi müdahale öncesinde medikal uzmanların ön çalışma yapmasına olanak sağlanır. Şekil 3.10' da HPÜ teknolojileri ile medikal uygulama safhaları görülmektedir.



Şekil 3.10. HPÜ teknolojisinin medikal uygulama safhaları [3, 26]

Stereocol isimli özel bir fotopolimer reçine ile medikal modellerin istenilen kısımları yüksek lazer enerjisine maruz bırakılarak renklendirilebilir. Beyine ait yumuşak dokular, tomografi verisine bağlı olarak inşa edilebilir ve değişik renklerde modellenebilirler. Bu sayede gelişmiş bir beyin ameliyatı planlaması yapılabilir (Resim 3.17).

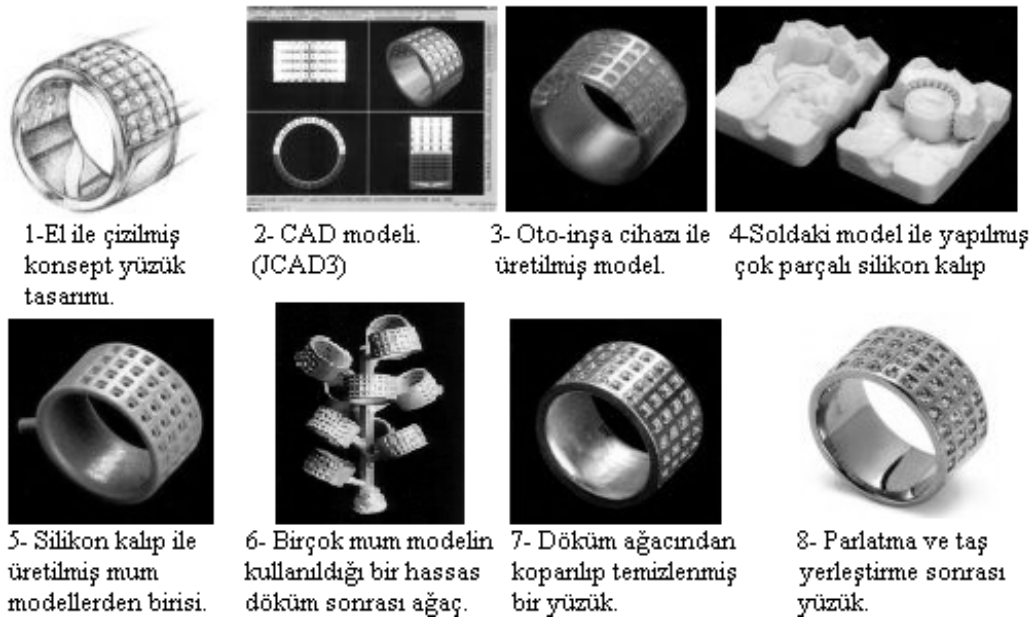


Resim 3.17. Ameliyat planlamasında kullanılmış kafatası modelleri

Yine aynı yöntemle elde edilen çene ve yüz modelleri sayesinde çene ve yüz cerrahisinde gerçekleştirilen ameliyatlara planlanabilmektedir

### 3.3.9. Kuyumculuk uygulamaları

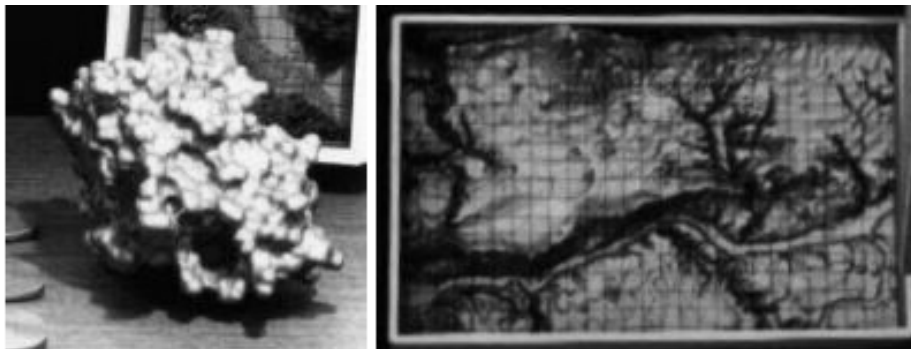
Kuyumculuk sektörü üretimlerinde işçilik yoğun çalışmalar çeşitli verimlilik ve kalite sorunlarını doğurmaktadır. HPÜ teknolojilerinin bu sektörde kullanımı ile birkaç hafta süre gerektiren el işçiliği çalışması bir gün gibi süreye indirgenebilir. Zaman tasarrufunun yanında el yeteneğinin ulaşamadığı tasarım detaylarına ulaşılabilir ve hata oranı azaltılır. Bunun için tasarımın bilgisayar ortamında bir CAD programı yardımıyla yapılması gerekmektedir. Sonrasında, HPÜ cihazı ile üretilen modeller kullanılarak *hassas fanus döküm* ile istenilen metalden (altın ve gümüş gibi) mücevherler dökülebilir. Şekil 3.11' de HPÜ teknolojileri kullanılarak mücevher tasarım ve üretim aşamaları görülmektedir.



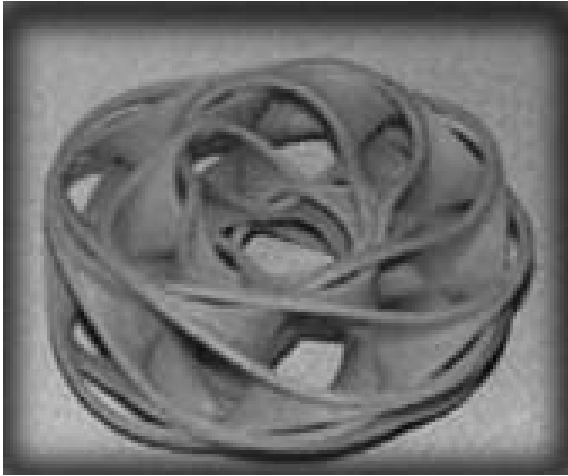
Şekil 3.11. Mücevher tasarım ve üretim uygulamasının aşamaları [3, 26]

### 3.3.10. Matematik, fizik ve kimya uygulamaları

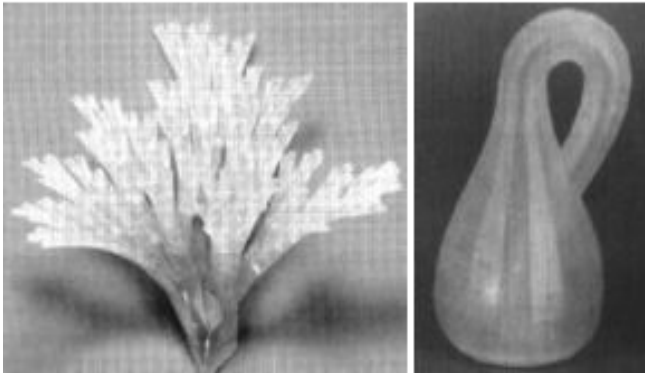
Matematik, fizik ve kimya alanlarında çeşitli formülasyonlar sonucu karşılaşılan geometrik modeller HPÜ teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Farklı tekniklerde üretilmiş çeşitli modeller aşağıdaki resimlerde görülmektedir (Resim 3.18-21). Bu görseller içerisinde molekül modelleri, matematiksel teorem modellemeleri gibi uygulamalar bulunmaktadır.



Resim 3.18. Molekül modeli, ve topografik bir model [26]



Resim 3.19. Isıtarak toz bağlama tekniği ile inşa edilmiş mobius bantları [26]



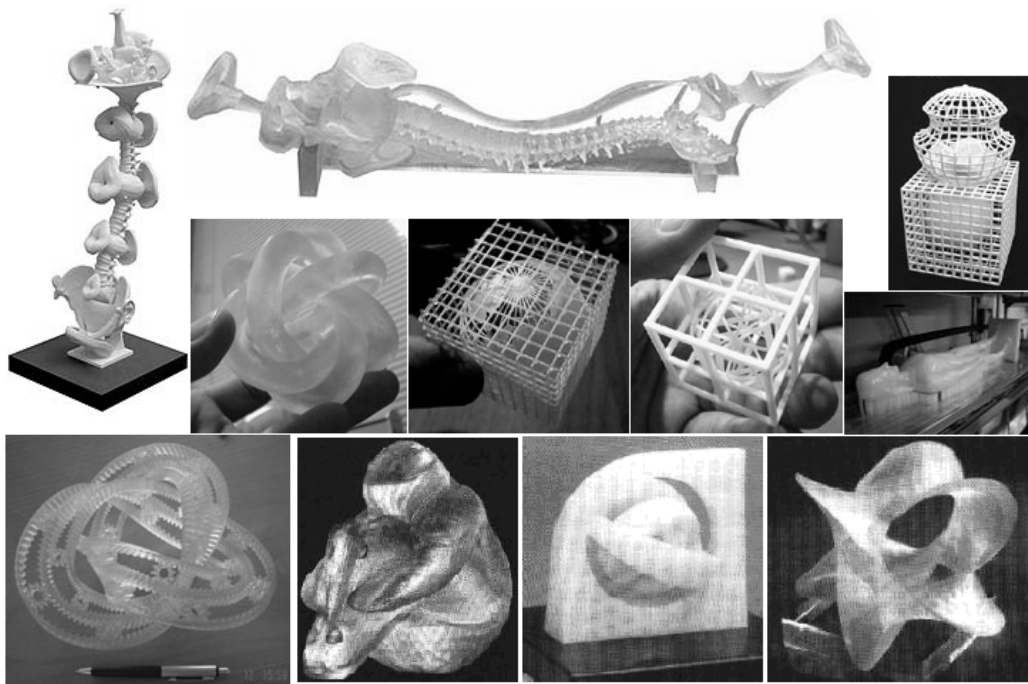
Resim 3.20. Tarayarak ışıkla kür tekniği ile inşa edilmiş Fraklat ağacı [26]



Resim 3.21. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile üretilen Nucleosome modeli [26]

### 3.3.11. Sanat uygulamaları

Heykeltıraşlık gibi sanat dallarında, sanat tekniklerinin üretime olanak vermediği sanatsal tasarımların HPÜ teknolojileri kullanılarak üretilmesi mümkündür. Böylece sanatçının düşünce gücü, üretilebilirlik ile sınırlandırılmamakta ve sanat dalının ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. Resim 3.22' de HPÜ teknolojileri ile üretilmiş sanatsal modeller görülmektedir.

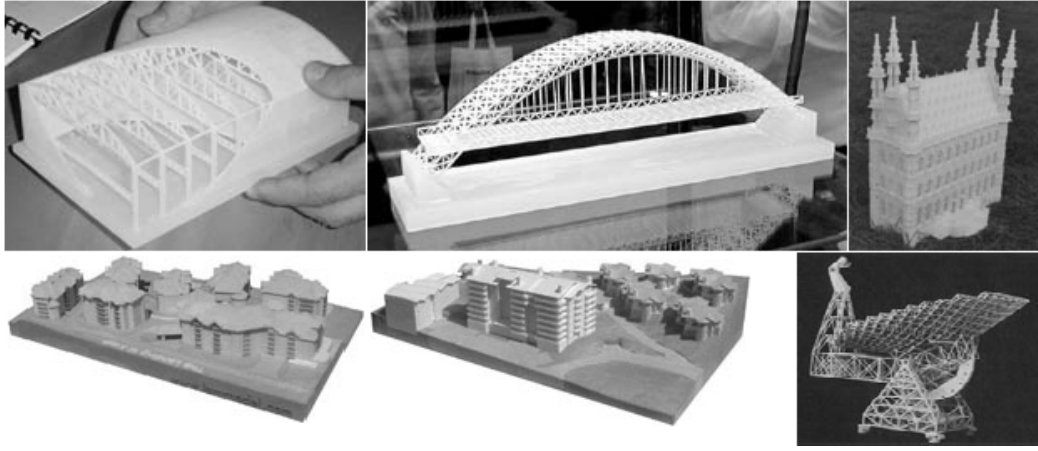


Resim 3.22. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş sanatsal modeller [3, 26]

### 3.3.12. Mimari uygulamalar

Mimari maketler ve topografik modeller çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Çok küçük ölçekli üretimlerine ihtiyaç duyulan bu maket ve modeller gerçeğe en yakın olarak HPÜ teknolojileri ile üretilebilmektedir.

Resim 3.23' de HPÜ teknolojileri ile inşa edilmiş örnek model ve maketler görülmektedir.



Resim 3.23. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mimari modeller [3, 26]

#### 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Küresel ekonominin dünya üzerindeki etkisi gündem araştırmalarının dikkat çekici konuları arasında yer almaktadır. Ekonomik unsurların etkileri bu derece yankı bulurken verimlilik, kalite, üretim ve Ar-Ge çalışmalarında maliyet ve zaman gibi kavramlar detayları ile birlikte derinlemesine incelenmeye devam etmektedir. Üretim tekniklerinde karşılaşılan ve en önemli kriterlerden birisi olan “ne üretilecek, ne biçimde üretilecek, nerede üretilecek?” soruları ürün niteliklerini, üretim yöntemlerini ve üretim teknolojilerini geliştiren doğrultuda çalışmalara sürüklemektedir. Bu çalışmalar HPÜ teknolojilerini de içerisinde barındırmaktadır ve prototip üretimindeki zaman ve maliyet unsurlarının önemli ölçülerde değişim gösterdiği anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, üretim zamanı ve maliyet unsurlarını karşılaştırmaya elverişli özellikleri içeren model tespit edilmiş, karşılaştırma hatalarına meydan vermeyecek niteliklere sahip malzemeler seçilmiştir. Belirlenen model farklı teknikler kullanan HPÜ cihazlarında üretilerek, üretim zamanı ve maliyet değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırma yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

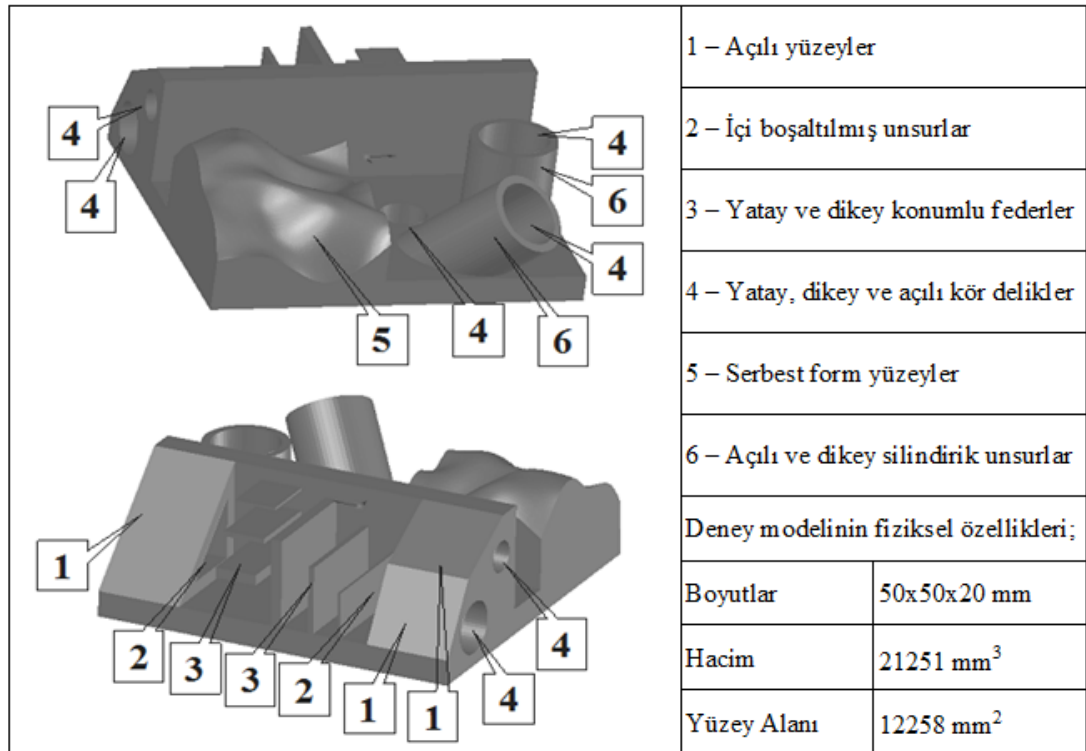
##### 4.1. Deney Modelinin Belirlenmesi

Deney modeli çalışmanın amacına uygun nitelikleri üzerinde barındıracak biçimde belirlenmiştir. Model alışılmış veya alışılmamış imalat teknikleri kullanılarak imal edilebilirliği zor veya imkansız unsurlar içermektedir. Modelin içerdiği bu unsurlar literatürde de görülebildiği gibi imal edilebilir olsa bile birkaç farklı imalat tekniğini bir arada kullanmayı gerektirmektedir. Model seçimi sadece imalat teknikleri değil şekilsel toleranslar, ölçü tamlığı, yüzey pürüzlülüğü gibi kalite kriterleri de dikkate alınarak belirlenmiştir.

HPÜ teknikleri modeli katmanlar halinde inşa prensibi ile oluşturmaktadır. Model üzerinde bilinçli olarak seçilen 45°, 30° ve 60° açılı düzgün formlu yüzeyler, içi

boşaltılmış unsurlar, yatay ve dikey konumlandırılmış farklı kesit ölçülerine sahip ince cidarlı federler, yatay, dikey ve açılı kör delikler, Freeform olarak tabir edilen serbest forma sahip yüzey, dar kesitli cidara sahip açılı ve dikey silindirik unsurlar katmanlar halindeki bu inşa prensibi ile inşa sonrasında yöntemin, malzemenin ve inşa cihazının özelliklerine göre üretim zamanını ve maliyet kriterlerini kıyaslamada doğru ve yararlı sonuçlara ulaşılmasına imkan sağlamıştır.

Deney modelinin unsurları Şekil 4.1’ de görülmektedir.



Şekil 4.1. Deney modeli ve üzerinde bulunan unsurlar [26]

#### 4.2. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan HPÜ Teknikleri ve Cihazları

Deneylerde 4 farklı inşa yöntemine sahip 4 farklı HPÜ cihazı kullanılmıştır. Bu cihazların seçiminde, hızlı prototipleme tekniklerinin imalat ihtiyaçlarına cevap verdiği sektörler araştırılmış ve endüstriyel çalışmalarda, makinacılık uygulamalarında yaygın tercih edilen HPÜ cihazları incelenmiştir.

Çizelge 4.1' de ülkemizde kullanılan HPÜ cihazlarının dağılımı görülmektedir. Bu çizelgede sıralanan HPÜ inşa yöntemleri endüstriyel prototip üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

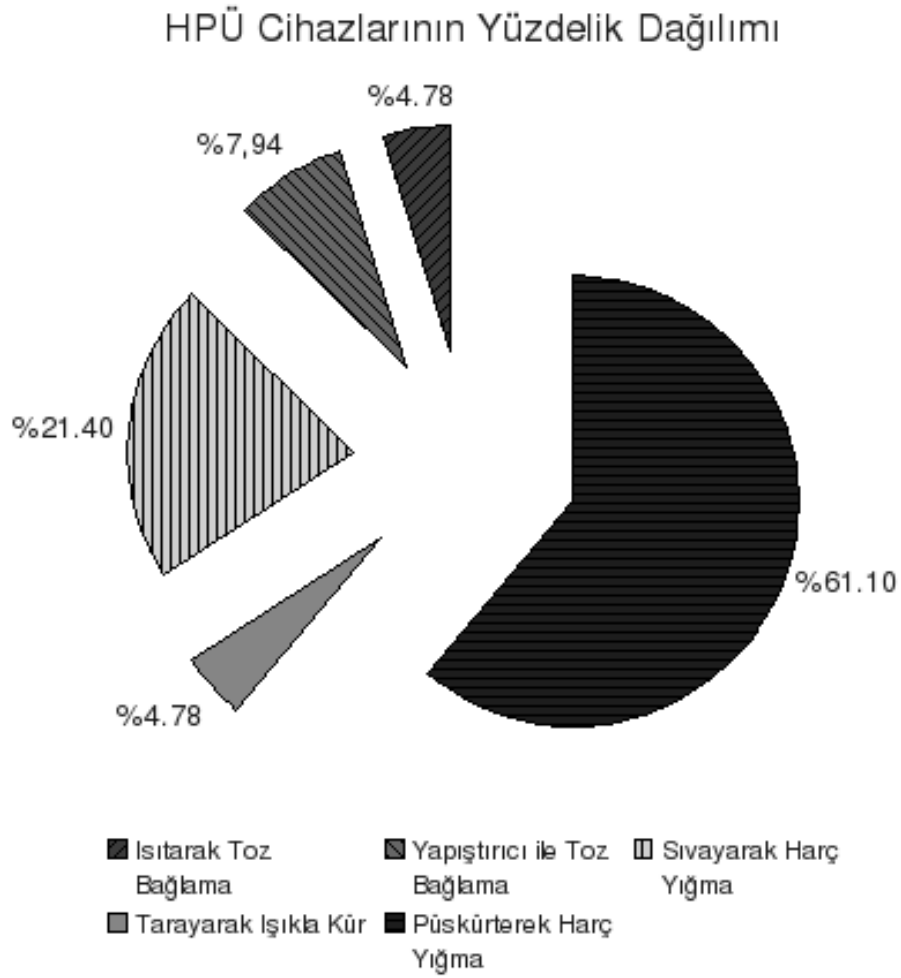
Bu yöntemlerden her biri farklı karakteristik özelliklere sahip oldukları için her bir HPÜ yönteminin daha başarılı olarak kullanıldığı bir endüstri alanı mevcuttur. Örneğin bu çalışmaya dahil edilmeyen püskürterek harç yığma HPÜ teknolojisi ülkemizde ve dünya çapında büyük oranlarda kuyumculuk sektörüne hitap etmektedir. Bu teknolojinin çalışma kapsamına alınmayışının bir diğer sebebi ise nispeten küçük bir yüzük modelini ortalama 80 saat gibi uzun bir sürede tamamlayabilir nitelikte inşa prensibine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. İnşa süresini bu çalışma kapsamında geliştirilen model üzerinde düşündüğümüzde yaklaşık 4,5 – 5 gün gibi bir inşa zamanı ortaya çıkacağı tespit edilmiştir.

Bu nedenlerden dolayı imalat setörün de yaygın olarak kullanılan ısıtarak toz bağlama, yapıştırıcı ile toz bağlama ve sıvayarak harç yığma ve tarayarak ışıkla kür HPÜ teknolojileri bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. Hızlı prototipleme teknolojilerine sahip cihazların inşa yöntemlerine göre dağılımı [3]

|                             | Deneylerde Kullanılan Teknikler | Ticari Tezgah Üreticileri | Türkiye’de Kullanılan Farklı Marka Sayısı | Türkiye’de Kullanılan Tezgah Sayısı | Yüzdelik Dağılım |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | +                               | 5                         | 2                                         | 6                                   | 4,78             |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | +                               | 2                         | 1                                         | 10                                  | 7,94             |
| Sıvayarak Harç Yığma        | +                               | 2                         | 2                                         | 27                                  | 21,4             |
| Tarayarak Işıklı Kür        | +                               | 8                         | 2                                         | 6                                   | 4,78             |
| Püskürterek Harç Yığma      | -                               | 4                         | 2                                         | 77                                  | 61,1             |

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, % 61,1’ lik dilimle püskürterek harç yığma tekniği en fazla orana sahiptir. Bu oranın yüksekliği üretim zamanının çok yüksek olması sebebi ile birden fazla cihaz yatırımına yönelinmesinden kaynaklanmaktadır. HPÜ teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen prototip üretimi; cihaz, hammadde ve yöntemlerin maliyetleri sebebiyle Çizelge 4.1’ de görülen tablo sonucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.2. Türkiye’de yerleşik HPÜ cihazlarının inşa yöntemlerine göre yüzdelik dağılımı [26]

HPÜ tekniklerinin seçiminde, kullanım oranlarının dışında, yöntemlerin birbirinden farklı özelliklere sahip olması kriterine de olanak sağlanmıştır. Bu kapsam dahilinde inşa malzemesi olarak toz kullanan ısıtarak toz bağlama ve yapıştırıcı ile toz bağlama teknikleri, lazer ışını kullanan tarayarak ışıklı kür ve ısıtarak toz bağlama teknikleri, ABS malzemenin ısıtılıp katmanlar halinde inşa prensibini kullanan sıvayarak harç yığma tekniği tercih edilmiştir.

Deneylerde kullanılan cihazların teknik özellikleri aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

#### 4.2.1. Isıtarak toz bağlama tekniğini kullanan cihaz

Bu yöntem için; deneylerde “EOS GmbH” firmasının ticari kullanıma sunduğu EOSINT P380 model HPÜ cihazı kullanılmıştır. Çizelge 4.2’ de bu cihazın teknik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.2. EOSINT P380 HPÜ cihazı teknik özellikleri [28]

| Teknik Özellikler            | Değerler                                       |
|------------------------------|------------------------------------------------|
| Max. Çalışma Boyutları       | 340 x 340 x 620 mm (13,4 x 13,4 x 24,4 inch.)  |
| Kullanılan Malzeme Çeşitleri | Polystyrene, Polyamide, Glass-filled polyamide |
| Katman Kalınlığı             | 0,1 – 0,15 mm (0,004 – 0,006 inch.)            |
| İnşa Hızı                    | 10-25 mm (0,4 -1 inch.) yükseklik/saat         |
| Kullanılan Lazer Tipi        | CO2, 50W                                       |
| Tarama Hızı                  | 5 m/saniye (197 inch./saniye)                  |

#### 4.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğini kullanan cihaz

Bu yöntem için; deneylerde “Z-CORPRATION” firmasının ticari kullanıma sunduğu Z310 model HPÜ cihazı kullanılmıştır. Çizelge 4.3’ de bu cihazın teknik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.3. Z310 HPÜ cihazı teknik özellikleri [28]

| Teknik Özellikler            | Değerler                                                                                 |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Max. Çalışma Boyutları       | 203 x 254 x 203 mm (8 x 10 x 8 inch.)                                                    |
| Kullanılan Malzeme Çeşitleri | Yüksek Performanslı Kompozit Plastik Tozlar, Elastomerik, Nişasta ve Alçı Tabanlı Tozlar |
| Katman Kalınlığı             | 0,089 – 0,203 mm (0,0035 – 0,008 inch.)                                                  |
| İnşa Hızı                    | 27-60 mm (1.063-2.362 inch.) yükseklik/saat                                              |
| Jet Sayısı                   | 1 adet 300 jetli HP                                                                      |

#### 4.2.3. Sıvı olarak harç yığma tekniğini kullanan cihaz

Bu yöntem için; deneylerde “STRATASYS” firmasının ticari kullanıma sunduğu Dimension model HPÜ cihazı kullanılmıştır. Çizelge 4.4’ de bu cihazın teknik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.4. Dimension HPÜ cihazı teknik özellikleri [28]

| Teknik Özellikler            | Değerler                                      |
|------------------------------|-----------------------------------------------|
| Max. Çalışma Boyutları       | 203 x 203 x 305 mm (8 x 8 x 12 inch.)         |
| Kullanılan Malzeme Çeşitleri | ABS                                           |
| Katman Kalınlığı             | 0,254 – 0,33 mm (0,010 – 0,013 inch.)         |
| İnşa Hızı                    | 20 - 30 mm (0,787-1,181 inch.) yükseklik/saat |
| Destek Malzemesi             | BASS (İkincil Malzeme Kartuşunda)             |

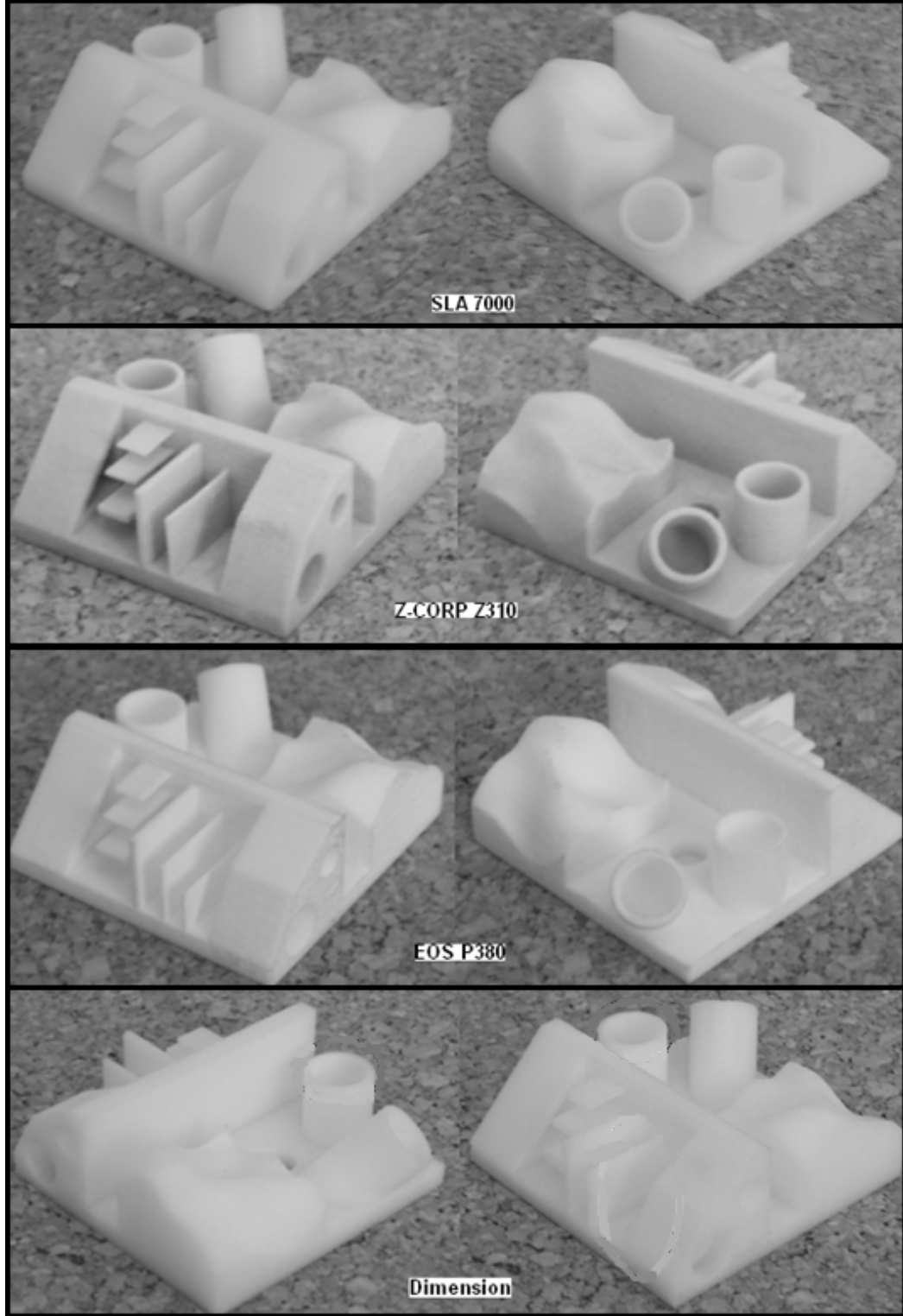
#### 4.2.4. Tarayarak ışıkla kür tekniğini kullanan cihaz

Bu yöntem için; deneylerde “3D SYSTEMS” firmasının ticari kullanıma sunduğu SLA 7000 model HPÜ cihazı kullanılmıştır. Çizelge 4.5’ te bu cihazın teknik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 4.5. SLA 7000 HPÜ cihazı teknik özellikleri [28]

| Teknik Özellikler            | Değerler                                 |
|------------------------------|------------------------------------------|
| Maksimum Çalışma Boyutları   | 508 x 508 x 584 mm (20 x 20 x 23 inch.)  |
| Kullanılan Malzeme Çeşitleri | Likid epoksi fotopolimer                 |
| Katman Kalınlığı             | 0,025 – 0,1 mm (0,001 – 0,004 inch.)     |
| İnşa Hızı                    | 4-7 mm (0,15 –0,28 inch.) yükseklik/saat |
| Kullanılan Lazer Tipi        | Nd:YVO <sub>4</sub> , 800mW              |
| Tarama Hızı                  | 2,54 – 9,52 m/saniye (140 - 525 ips)     |

Farklı HPÜ cihazlarında üretilmiş deney modelleri Şekil 4.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Farklı HPÜ cihazlarında üretilmiş deney modelleri

### 4.3. Üretimlerde Kullanılan Hammaddeler

Bu çalışma kapsamında kullanılan HPÜ inşa teknikleri ve seçilen cihazlara uygun olarak, Bölüm 3’ de detayları verilmiş olan hammaddelerden deneylerde kullanılmış olanlar Çizelge 4.6’ da toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.6. Deneylerde kullanılan hammaddeler

| Kullanılan Teknik           | Cihaz Modeli | Kullanılan Hammadde |
|-----------------------------|--------------|---------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | EOSINT P380  | PA2200              |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | Z310         | ZB63                |
| Sıvayarak Harç Yığma        | Dimension    | ABS P400            |
| Tarayarak Işıklı Kür        | SLA 7000     | Somos 14120 White   |

Bu hammaddelerin seçiminde, yaygın kullanım oranı dikkate alınarak, anket yöntemi kullanılmıştır. Hammadde çeşitliliği, üretilebilirlik kriterlerine sağladığı uyumluluk gibi çok farklı nedenler ile yaygın kullanıma etki eder.

### 4.4. Üretim Zamanı ve Maliyetin Değerlendirilmesi

Deneysel çalışmada, çalışmanın amacına uygun olarak modelin inşa edileceği HPÜ cihaz ve teknolojiler ile ilgili yukarıda sunulan veriler ışığında seçilen model aşağıda belirtilen işlem basamakları esasına göre inşa edilmiştir.

Model inşa süreci basamakları,

1. Hazırlık Aşaması
  - a. 3B Parça tasarımının arayüz formata dönüştürülmesi
  - b. Arayüz formatının düzenlenmesi ve iyileştirilmesi
  - c. Destek yapılarının tasarlanması
  - d. İnşa parametrelerinin oluşturulması
  - e. İnşa katmanlarının oluşturulması

2. Parça İnşa Aşaması
  - a. Hızlı Prototipleme cihazı ön hazırlık işlemleri
  - b. Parça inşa işlemleri
  - c. Son inşa işlemleri
3. İnşa Sonrası İşlemler
  - a. Destek yapılarının temizlenmesi
  - b. Parçanın temizlenmesi

Deney modeli, belirtilen materyal ve yöntemler doğrultusunda 4 farklı HPÜ cihazında yukarıda belirtilen süreçler takip edilerek inşa edilmiştir.

#### **4.4.1. Üretim zamanı**

Tasarım işlemlerinin tamamlanması ile başlayan üretim, hedef ürünün ele alınmasına kadar devam etmektedir. Bu süreçte geçen toplam süre üretim zamanı olarak değerlendirilmektedir.

Çalışmada üretim zamanı; hazırlık aşaması, inşa aşaması, inşa sonrası işlemler olarak bölümlendirilmiştir. Tüm bu bölümlerin bir arada değerlendirilmesi ile toplam üretim zamanı irdelenmiştir. Üretime başlamak için gerekli ayarlama işlemleri, donanım ve malzemelerin kullanılabilir durumda üretim yerinde hazır edilmesi, hazırlık aşaması olarak değerlendirilmiştir. İnşa aşaması ise, HPÜ cihazının gerekli ayar ve düzenlemeleri yapıldıktan sonra çalıştırılması ile başlayarak, çalışma esnasında hammadde sarfiyatının da devam ettiği, modelin ortaya çıkarılması bölümüdür. İnşa aşamasının sonlanması ile ortaya çıkan modelin HPÜ cihazından alınması ile başlayan, tasarıma uygun düzenleme, temizleme gibi sonlandırma işlemlerinin yapıldığı bölüm ise inşa sonrası işlem süreçleri olarak değerlendirilmiştir. Deneylerde kronometre kullanılarak, toplam üretim zamanını oluşturan tüm bölümler ayrı ayrı ve dakika biriminde tespit edilmiştir.

#### 4.4.2. İşçilik

Deney modelinin inşa edilebilmesi için bir personelin HPÜ cihazına operatörlük yapması gerekmektedir. Bu personel; bilgisayar destekli cihazları kullanabilen, orta düzeyde ingilizce bilgisine sahip, kullanılan hızlı prototipleme tekniğine hakim, hassas ölçü ve kontrol aletlerini kullanabilir niteliklerde olmalıdır.

Personel maliyetinin işçiliğe etkisi değerlendirilirken, HPÜ cihazına operatörlük yapan personelin yıllık maliyeti dakika biriminde kullanılmıştır. Bu sayede, üretim zamanı ve işçilik arasında birimlerin uyumluluğu sağlanmıştır.

Operatör inşa öncesi hazırlık işlemleri ve inşa sonrası işlemlerde aktif işçilik sergilemektedir. Ancak personel birim maliyeti hesaplanırken atıl süreler de dikkate alınmaktadır. Personelin üretim sürecinde gösterdiği maliyet, ürün maliyetine etkileyen işçiliği oluşturmaktadır [26]. Personel birim maliyeti, personelin aktif olduğu sürelerle ilişkilendirilerek işçilik hesaplanmıştır (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. İşçiliğin hesaplanması

| İşçiliğin Hesaplanmasında Etkili Çarpanlar |                                             |        |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|--------|
| Kısaltma                                   | Açıklama                                    | Birim  |
| A                                          | İşçilik $[A = (a) \times (b)]$              | \$     |
| (a)                                        | İnşa öncesi ve inşa sonrası süreler toplamı | min    |
| (b)                                        | Personel birim maliyeti                     | \$/min |

Deneylerde, HPÜ cihazlarına operatörlük yapan personelin \$/saat biriminde maliyeti, yıllık personel giderleri dikkate alınarak, aritmetik ortalama yöntemi ile 60 \$/h şeklinde belirlenmiştir. Personel birim maliyetinin, işçilik hesaplanmasında kullanılacağı düşünüldüğünde, birimlerin uyumluluğunu sağlamak amacı ile 1 \$/min değeri dikkate alınmıştır.

#### 4.4.3. Cihaz maliyetinin toplam maliyete yansımaları

Üretim prosesinin gerçekleşebilmesi için gerekli çerçevede yatırım tamamlanmış olmalıdır. HPÜ tekniği ile üretim yapabilmek için yatırımı gerekli ana unsur HPÜ cihazıdır. Yatırım maliyetine etkiyebilecek yan unsurlar ise HPÜ cihazının çalışması için ihtiyaç duyulan kompresör, regülatör gibi teçhizatlardır [26]. Deneyde kullanılan cihazların ilk maliyetleri Çizelge 4.8' de belirtilmiştir. Verilen maliyetler cihaz satışının yapıldığı ülkenin F.O.B. (Free On Board – Tedarik edilen ülkedeki satış fiyatını işaret eden satınalma terimi) değerleridir.

Çizelge 4.8. Yatırım maliyeti [23]

| Cihaz     | HPÜ Tekniği                 | Satış Fiyatı (\$) | Tedarik Menşei |
|-----------|-----------------------------|-------------------|----------------|
| Z 310     | Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | 25,900            | Amerika        |
| EOS P380  | Isıtarak Toz Bağlama        | 390,000           | Almanya        |
| Dimension | Sıvayarak Harç Yığılma      | 24,900            | Amerika        |
| SLA7000   | Tarayarak Işıklı Kür        | 650,000           | Amerika        |

Dikkate alınması gereken bir etken de ekipman ve periyodik bakım maliyetleridir. Bu maliyetler cihazların kullanımlarında göre değişkenlik göstermekte olup ortalama olarak cihaz satış fiyatının %10-25' i aralığındadır. Servis ve bakım anlaşmalarından kaynaklanan giderler, stok gereksinimi, amortisman, elektrik ve işletme idari giderleri, işletme maliyetini oluşturan ana unsurlardır [26].

HPÜ cihazının birim maliyeti, yatırım maliyeti, yıllık işletme maliyetleri ve amortisman kriterleri bir arada değerlendirilerek hesaplanabilir. Bu maliyetler işletmelerin yapısına, büyüklüğüne göre farklılık göstermektedir [26].

Deneylerde kullanılan cihazların birim maliyeti \$/min olarak değerlendirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği işletmelerde cihaz birim maliyetleri anket yöntemi ile belirlenmiş olup cihaz maliyetleri 60-90 \$/h aralığında tespit edilmiştir. HPÜ

cihazlarının toplam maliyete yansması, cihaz birim maliyetinin inşa süresi ile ilişkilendirilmesiyle hesaplanmıştır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. HPÜ cihazının maliyet etkisinin hesaplanması

| <b>Cihazın Maliyete Etkisinin Hesaplanmasında Kullanılan Çarpanlar</b> |                                                |        |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------|
| Kısaltma                                                               | Açıklama                                       | Birim  |
| B                                                                      | Cihazın Maliyete Etkisi $[B = (c) \times (d)]$ | \$     |
| (c)                                                                    | İnşa süresi                                    | min    |
| (d)                                                                    | Cihaz birim maliyeti                           | \$/min |

#### 4.4.4. Hammadde maliyeti

Deneylerde kullanılan hammaddeler, inşa sürecinde sarf edilmiş ve deney modellerinin inşası sağlanmıştır. HPÜ cihazlarında kullanılan hammaddeler inşa süreci öncesinde ve sonrasında ölçülerek sarfiyatın miktarı belirlenmiştir. Bu ölçümler, hammaddenin niteliğine uygun birimler ile (hacim, ağırlık, uzunluk) yapılmıştır. Hammadde maliyeti değerlendirilirken, atıl tüketilen hammaddeler ve destek yapıları için kullanılan hammaddeler de dikkate alınmıştır. Sarf edilen hammaddelerin miktarları Çizelge 4.10’ da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Deneylerde sarf edilen hammadde miktarları

| <b>HPÜ Tekniği</b>          | <b>Hammadde</b>   | <b>Tüketim Miktarı</b> |
|-----------------------------|-------------------|------------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | PA2200            | 106 gr                 |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | ZB63              | 118 gr                 |
| Sıvayarak Harç Yığma        | ABS P400          | 32 m                   |
| Tarayarak Işıklı Kür        | Somos 14120 White | 25 cm <sup>3</sup>     |

#### 4.4.5. Toplam ürün maliyeti

Toplam ürün maliyetini oluşturan parçalar; işçilik, cihaz birim maliyeti ve hammadde olarak değerlendirilmiştir. İşletmelerin özelliklerinden dolayı değişkenlik gösteren ve hesaplanamayan maliyetler değerlendirme dışında tutulmuştur. Bunlar; vergi, kar oranı gibi maliyetlerdir. Çizelge 4.11’ de toplam ürün maliyeti hesaplanırken kullanılan unsurlar görülmektedir.

Çizelge 4.11. Toplam ürün maliyetini oluşturan unsurlar

| <b>Toplam Ürün Maliyetinin Hesaplanması</b> |                                      |       |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|-------|
| Kısaltma                                    | Açıklama                             | Birim |
| X                                           | Toplam Ürün Maliyeti (X = A + B + C) | \$    |
| A                                           | İşçilik                              | \$    |
| B                                           | Cihaz Birim Maliyeti                 | \$    |
| C                                           | Hammadde Maliyeti                    | \$    |

Deney modelinin üretim maliyeti kullanılan teknikleri için ayrı ayrı hesaplanmış ve bu hesaplamaların detayları aşağıda verilmiştir. (Çizelge 4.12-15)

Bu çizelgelerde; maliyet hesaplanması için geliştirilmiş formül görülmektedir. Toplam ürün maliyetini oluşturan üç ana unsur işçilik, cihaz birim maliyeti, hammadde maliyeti şeklinde bir arada değerlendirilerek, bu değerlerin toplamı hesaplanmıştır.

Toplam ürün maliyetini hesaplarken kullanılan üç ana unsuru oluşturan, inşa öncesi ve sonrası süreler toplamı, personel birim maliyeti, inşa süresi, cihaz birim maliyeti kalemleri rakamsal değerleri dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.12. Isıtarak toz bağlama tekniği için maliyet hesaplanması

| Hesaplama                                                                                         | Açıklama                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X = A + B + C$                                                                                   | X – Toplam Ürün Maliyeti<br>A – İşçilik<br>B – Cihaz Birim Maliyeti<br>C – Hammadde Maliyeti                          |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                     | a – İnşa Öncesi/Sonrası Süreler Toplamı<br>b – Personel Birim Maliyeti<br>c – İnşa Süresi<br>d – Cihaz Birim Maliyeti |
| $X = (35 \text{min} \times 1 \$/\text{min}) + (110 \text{min} \times 1,5 \$/\text{min}) + 140 \$$ |                                                                                                                       |

Çizelge 4.13. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği için maliyet hesaplanması

| Hesaplama                                                                                       | Açıklama                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X = A + B + C$                                                                                 | X – Toplam Ürün Maliyeti<br>A – İşçilik<br>B – Cihaz Birim Maliyeti<br>C – Hammadde Maliyeti                          |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                   | a – İnşa Öncesi/Sonrası Süreler Toplamı<br>b – Personel Birim Maliyeti<br>c – İnşa Süresi<br>d – Cihaz Birim Maliyeti |
| $X = (43 \text{min} \times 1 \$/\text{min}) + (30 \text{min} \times 1,2 \$/\text{min}) + 81 \$$ |                                                                                                                       |

Çizelge 4.14. Sıvayarak harç yığma tekniği için maliyet hesaplanması

| Hesaplama                                                                                        | Açıklama                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X = A + B + C$                                                                                  | X – Toplam Ürün Maliyeti<br>A – İşçilik<br>B – Cihaz Birim Maliyeti<br>C – Hammadde Maliyeti                          |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                    | a – İnşa Öncesi/Sonrası Süreler Toplamı<br>b – Personel Birim Maliyeti<br>c – İnşa Süresi<br>d – Cihaz Birim Maliyeti |
| $X = (55 \text{min} \times 1 \$/\text{min}) + (50 \text{min} \times 1,1 \$/\text{min}) + 110 \$$ |                                                                                                                       |

Çizelge 4.15. Tarayarak ışıkla kür tekniği için maliyet hesaplanması

| Hesaplama                                                                                       | Açıklama                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X = A + B + C$                                                                                 | X – Toplam Ürün Maliyeti<br>A – İşçilik<br>B – Cihaz Birim Maliyeti<br>C – Hammadde Maliyeti                          |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                   | a – İnşa Öncesi/Sonrası Süreler Toplamı<br>b – Personel Birim Maliyeti<br>c – İnşa Süresi<br>d – Cihaz Birim Maliyeti |
| $X = (43 \text{min} \times 1 \$/\text{min}) + (240 \text{min} \times 1 \$/\text{min}) + 127 \$$ |                                                                                                                       |

## 5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

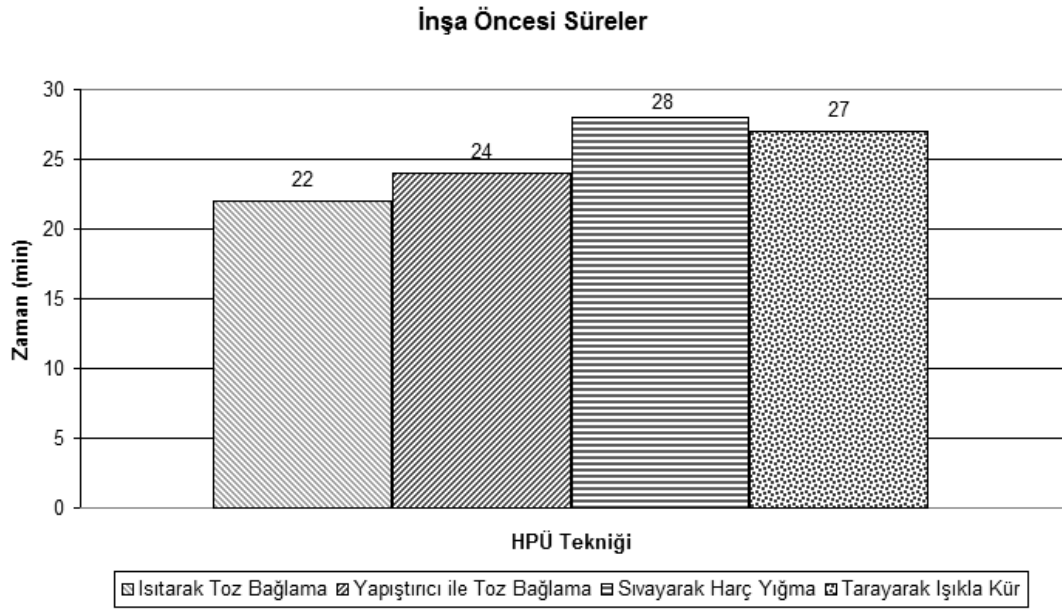
### 5.1. Üretim Zamanı

Deneylede, toplam üretim zamanını oluşturan inşa öncesi, inşa aşaması ve inşa sonrası süreçlerinde harcanan zaman tespit edilmiş ve bu verilerin bir arada değerlendirilmesi ile toplam üretim zamanı yorumlanmıştır. Toplam üretim zamanını oluşturan tüm süreçler ve bu süreçlerin zamana etkileri ayrı ayrı ele alınmıştır.

#### 5.1.1. İnşa öncesi hazırlık süreci ve zamana etkisi

CAD datasının STL formatına dönüştürülmesi ve STL formatı üzerinde düzeltme, dönüştürme işlemlerinin yapılması için ticari paket programı olarak HPÜ cihazı kullanıcılarına sunulan bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar aracılığı ile data uygun hale getirildiğinde inşa kriterleri tespit edilir. Öncelikle modelin HPÜ cihazı tablasındaki konumu ve yönü belirlenir. Konumlandırma destek yapılarının biçimlendirilmesinde ve katman sayısında önem taşımaktadır. Başlangıç düzleminden Z eksenine doğrultusunda inşa işlemine devam eden HPÜ cihazı, katmanlar halinde inşa işlemini sürdürdüğü için toplam çevrimin tamamlanmasında Z eksenine doğrultusundaki model ölçüsü doğrudan etkilidir. Aynı şekilde Z eksenine doğrultusunda, inşa esnasında yer çekimine yenik düşebilecek girintili ve çıkıntılı kısımların korunması eğer gerekli ise uygun destek yapıları tasarlanmaktadır. Bilgisayarlı işlemler olarak da adlandırılabilcek bu işlemlerin ardından HPÜ cihazı başlangıç konumuna getirilerek inşa aşamasına hazır hale getirilir.

Deneylelerin gerçekleştirildiği 4 farklı HPÜ cihazı için birbirine çok benzer işlemler yapılmıştır. Bu nedenle hazırlık aşamaları için deneylelerde tespit edilen süreler çok az farklılık göstermektedir. Bu değerler, Şekil 5.1' de dakika cinsinden verilmiştir.



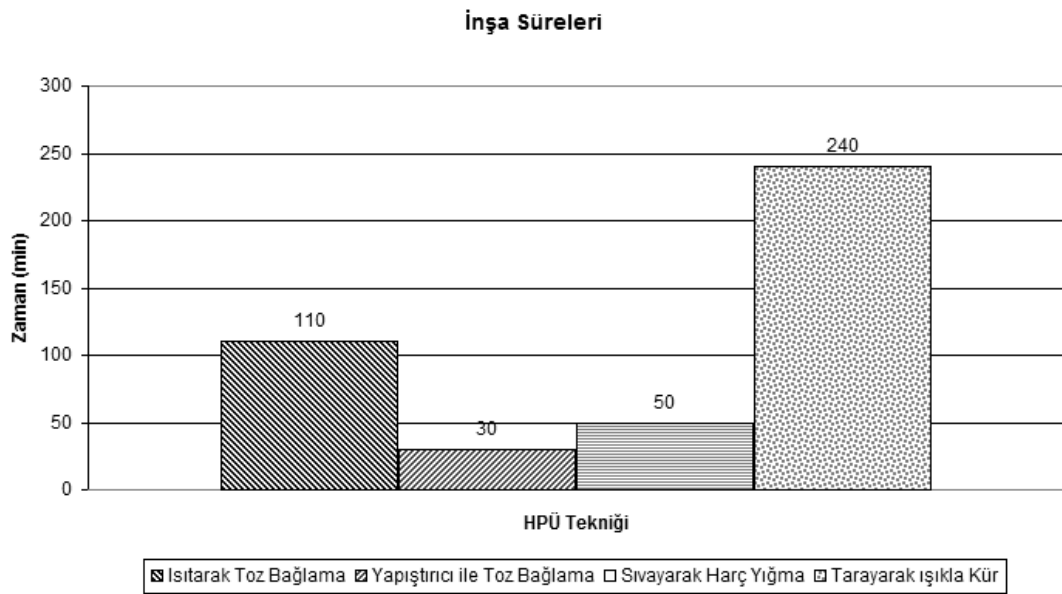
Şekil 5.1. İnşa öncesi süreler

Isıtarak toz bağlama ve yapıştırıcı ile toz bağlama tekniklerinde sırasıyla 22 ve 24 dakika süre sarf edilmiştir. Bu teknikler ile üretimde inşa malzemesi toz forma olduğundan destek yapısına ihtiyaç duyulmamaktadır ve destek yapısı tasarımı ve konumlandırılması için süre harcanmamıştır. Sıvayarak harç yığma ve tarayarak ışıklı kür tekniklerinde ise destek yapıları tasarımı ve konumlandırılması gerçekleştirildiğinden, nispeten daha fazla süreye ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile, bu yöntemlerde süre 28 dakikaya kadar çıkmıştır.

### 5.1.2. İnşa aşaması

Hazırlıkların tamamlanması ardından inşa işlemi başlatılan HPÜ cihazının parça inşasını tamamlayana kadar geçirdiği süreye katman kalınlığı ve inşa hızı doğrudan etkilidir. HPÜ tekniklerinin çalışma sistemlerine bağlı olarak katman kalınlıkları tekniklere göre farklı sınır değerler aralığındadır ve her tekniğe dahil HPÜ cihazında ayarlanabilir katman kalınlığı aralığı bulunmaktadır. Modelin formu ve hedeflenen yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler ile belirlenen katman kalınlığı Z eksenini doğrultusundaki model yüksekliği ile doğru orantılı olarak inşa süresine etker.

Katmanları, HPÜ tekniğinin gereği biçiminde (toz bağlama, harç yığma, ışıkla kür) inşa eden tarayıcı ünitenin yatay konumdaki hızı, inşa hızı olarak tanımlanır ve inşa süresine doğrudan etkilidir [35]. Deneylerde Şekil 5.2' de görülen inşa süreleri elde edilmiştir.



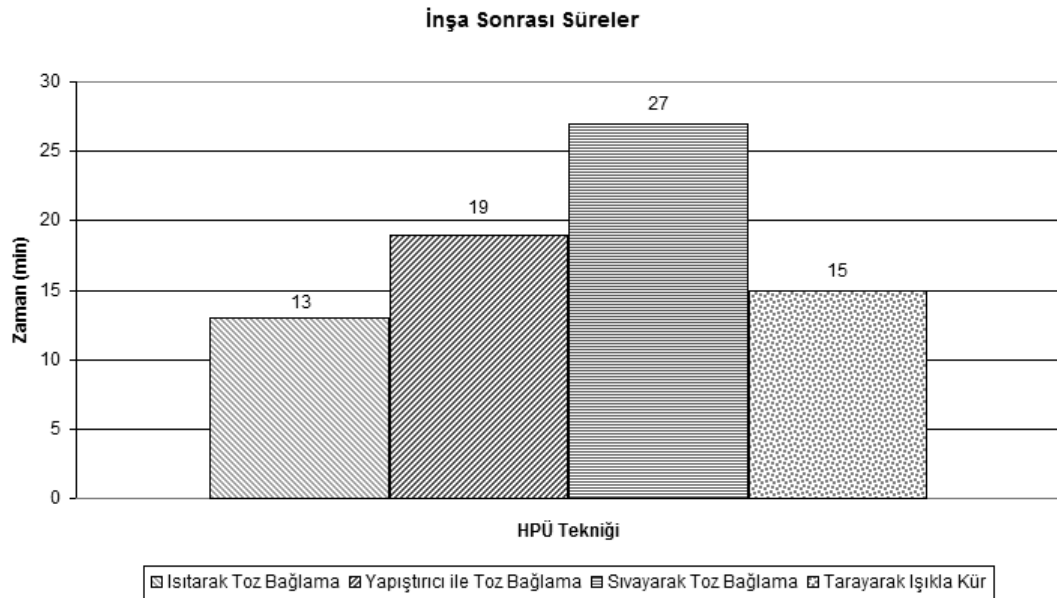
Şekil 5.2. İnşa süreleri

HPÜ tekniklerinin çalışma prensiplerinin birbirlerinden tamamen farklı olması nedeni ile deney sonuçlarında da birbirine benzerlik göstermeyen süreler tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre en uzun inşa süresini 240 dakika ile tarayarak ışıklı kür tekniği ile SLA7000 cihazı gösterirken, ısıtarak toz bağlama tekniğine sahip EOS P380 cihazı 110 dakika, sıvayarak harç yığma tekniği ile çalışan Dimension cihazı 50 dakika ve yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile Z310 cihazı 30 dakika ile en kısa inşa süresini göstermiştir.

### 5.1.3. İnşa sonrası işlem süreçleri

İnşası tamamlanan parça HPÜ cihazından alındıktan sonra hedef tasarıma uygun hale getirilmesi için destek yapılarının ve/veya parçanın temizlenmesi işlemlerinden geçirilir. Toz formdaki destek yapıları uygun bir fırça ile süpürülerek

temizlenebileceği gibi vakum yardımı ile parça üzerinden emilerek de temizlenebilir. Hazırlık aşamasında tasarlanarak üretilmiş destek yapıları ise tasarımına uygun biçimde kesilerek, kırılarak veya destek yapısı hammaddesi izin veriyorsa, su içerisinde erime özelliği sayesinde, suda eritilerek temizlenir. Tekniğin gerektirdiği temizleme yöntemleri kullanılarak destek yapıları temizlenirken parça üzerinde destek yapısı hammaddesi veya parça inşa hammaddesi kalıntıları olup olmadığı kontrol edilerek aynı yöntemler ile temizlenir. Kullanılan hammadde ve/veya HPÜ tekniğinin gereksinimine göre inşa sonrasında ısı altında fırınlama, UV ışık ile kürlendirme gibi sonlandırma işlemlerinin yapılması gerekebilir. Deneylerde elde edilen inşa sonrası işlem süreleri Şekil 5.3. de görülmektedir.



Şekil 5.3. İnşa sonrası süreler

Isıtarak toz bağlama tekniğinde EOS P380 cihazında inşa edilen parça, fırça yardımı ile destek yapısını oluşturan tozlardan temizlenmiştir. Temizleme işlemi küçük ölçülü delikler ve girintili yüzeylerdeki kalıntılar vakumdan faydalanılarak temizlenmesi ile inşa sonrası işlemler tamamlanmıştır. Yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinde Z310 cihazından elde edilen parça fırça yardımı ile temizlenirken parça yüzeylerinde gözlemlenen kalıntılar ayrıca temizlenmiştir.

Sıvayarak harç yığma tekniğinde Dimension cihazından elde edilen parça uygun profilde kesici aletler kullanılarak destek yapılarından temizlenmiştir. Bu işlemlerin operatör yeteneği gerektirdiği ve dolayısı ile zaman gereksiniminin nispeten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tarayarak ışıkla kür tekniğinde SLA7000 cihazından elde edilen parça her hangi bir temizlik işlemi gerektirememiştir ancak UV ışık altında kürlenmiştir.

#### 5.1.4. Toplam üretim zamanı

Toplam üretim zamanı Çizelge 5.1' de görülen toplam üretim zamanı tablosunda karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Toplam üretim zamanı

| <b>Teknik</b>               | <b>Zaman (min)</b> |
|-----------------------------|--------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | 145                |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | 73                 |
| Sıvayarak Harç Yığma        | 105                |
| Tarayarak Işıkla Kür        | 282                |

Deney modeli farklı HPÜ cihazlarında üretilirken, ısıtarak toz bağlama tekniğinde toplam 145 dakika harcanırken yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğinde 73 dakika, sıvayarak harç yığma tekniğinde 105 dakika ve tarayarak ışıkla kür tekniğinde 282 dakika harcanmıştır.

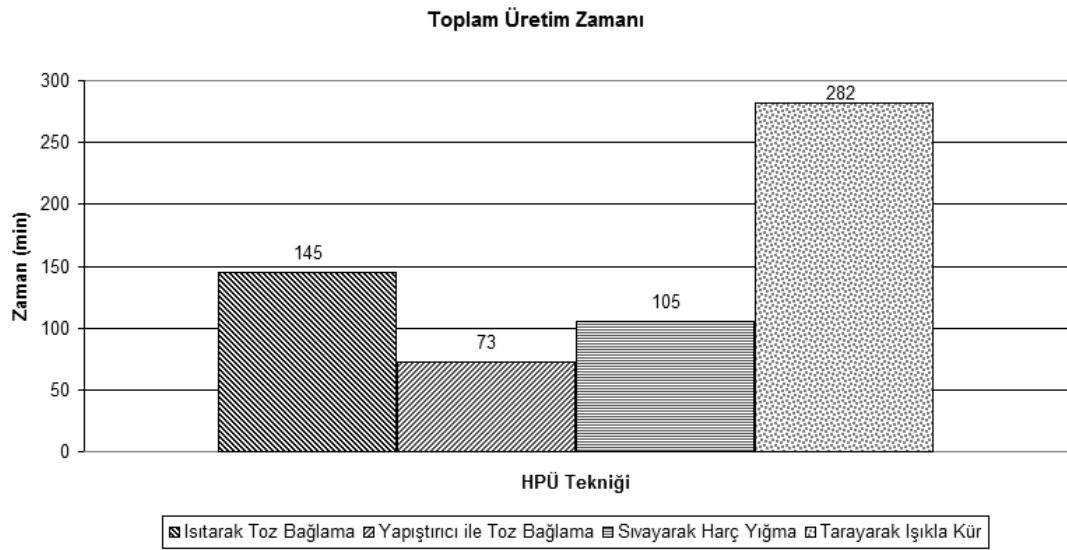
Bu sonuçlardan yola çıkarak, kalite kriterleri ve maliyet etkisi dışında zaman öncelikli çalışmalarda en kısa üretim zamanını veren yapıştırıcı ile toz bağlama tekniğini kullanan Z310 cihazı tercih edilmektedir.

Deneylerde elde edilen inşa öcesi işlemler, inşa aşaması ve inşa sonrası işlemler süreleri Çizelge 5.2' de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Toplam üretim zamanını oluşturan süreler

| HPÜ Tekniği                 | Cihaz     | İnşa Öncesi İşlemler (min) | İnşa Aşaması (min) | İnşa Sonrası İşlemler (min) |
|-----------------------------|-----------|----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | EOS P380  | 22                         | 110                | 13                          |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | Z310      | 24                         | 30                 | 19                          |
| Sıvayarak Harç Yığma        | Dimension | 28                         | 50                 | 27                          |
| Tarayarak Işıkla Kür        | SLA7000   | 27                         | 240                | 15                          |

Bu sürelerin toplamı, HPÜ cihazı ile üretilen parçaların toplam üretim zamanını vermektedir. Şekil 5.4’ de tekniklere göre toplam üretim zamanları verilmiştir.



Şekil 5.4. Toplam üretim zamanı

## 5.2. Maliyet

Parçaları üretebilmek için gerekli girdilerin parasal karşılığı olarak değerlendirilmesi maliyet tanımını meydana getirmiştir [23]. HPÜ cihazlarında üretilen parçaların maliyetlerini oluşturan unsurlar üç ana başlık altında değerlendirilmiştir. Bu başlıklar; işçilik maliyeti, işletme maliyetleri, hammadde maliyetleri şeklindedir. İşçilik maliyeti irdelenirken, personel giderleri ve üretim çalışmaları esnasında sergilenen işçiliklerin maliyete etkisi değerlendirmeye alınmıştır. İşletme maliyetleri kapsamında, işletme idari masrafları, cihaz yatırım maliyetleri, amortisman, servisi-bakım gibi giderler değerlendirilerek cihaz saatlik maliyeti ortaya çıkarılmıştır. Bu cihaz saatlik maliyeti, cihaz inşa süresi ile ilişkilendirilerek işletme maliyetleri sonucu elde edilmiştir. Hammadde maliyetleri kapsamında ise, tüketilen miktarlardaki hammaddelerin satınalma maliyetleri değerlendirilmiştir.

Toplam maliyeti oluşturan unsurlar ayrı ayrı değerlendirilmiş ve toplam maliyet karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

### 5.2.1. İşçilik maliyetleri

İşçilik maliyeti personel gideri ve işçilik süresi ile bağıntılıdır. Personel gideri ve işçilik süresi, işletmede kullanılan personel ve cihaz sayısı ile farklı işletmelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin birden fazla cihaza sahip olan işletmenin yatırım maliyeti yükselirken iki cihazı tek personelin yönetmesi işçilik maliyetlerini düşürmektedir.

Deney modelinin inşasında kullanılan 4 farklı cihazda yapılan deneylerde, operatör; inşa öncesi hazırlık işlemleri ve inşa sonrası işlemlerde 35-55 dakika aralığında işçilik süresi harcamaktadır. Buna paralel olarak, deneylerde işçilik maliyetleri 35-55 \$ aralığında tespit edilmiştir.

### 5.2.2. İşletme ve yatırım maliyetleri

Hızlı Prototipleme cihazları ile üretim gerçekleştiren işletmelerin, faaliyetlerinin devamlılığını sağlarken karşılaştığı giderler işletme maliyetlerini oluşturmaktadır.

Başlıca işletme giderini, uygun boyut ve özellikte işyeri gereksinimi oluşturmaktadır. İşyeri, yatırımı yapılmış cihazın çalışması esnasında ihtiyaç duyduğu elektrik, basınçlı hava, temiz ortam gibi alt yapılara sahip olmalıdır. Üretim öncesi hazırlık işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için bilişim altyapısının yerleşmiş ve gerek duyulan bilgisayar yazılımlarının aktif olması gerekmektedir. İşletme, hızlı prototipleme cihazında kullanılacak hammaddelerin tedarikini yapabilecek düzeyde satınalma sistemini geliştirmiş olmalıdır ve bu hammaddeler yabancı menşeli olduğundan gerek duyulan satın alma sistemi ithalat prosedürlerine de elverişli olmalıdır. İşletmeler arasındaki yapısal farklılıklar ve bu farklılıkların birim ürün maliyetine etkisi değişken olduğundan rakamsal değerleri çalışma kapsamına alınmamıştır.

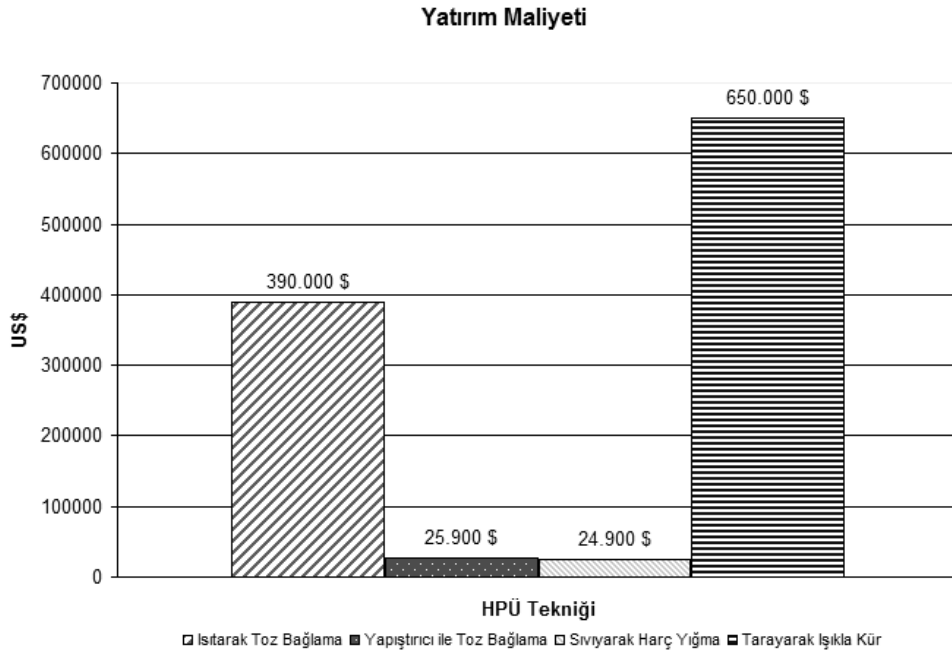
Uygun altyapı bulunduran işletmelerin başlıca yatırım gereksinimi HPÜ cihazıdır. Yatırımı tamamlanan cihazlar, yıllık bazda servis-bakım anlaşmalarından kaynaklanan sabit giderlere ve çalışma esnasında tüketimde bulundukları elektrik gibi yan maliyetlere gereksinim gösterirler. Amortisman kriterleri de dikkate alındığında işletmelerin maliyet unsurunu kontrol altına almada kullandıkları “cihaz saatlik maliyeti” kavramı ortaya çıkmaktadır. Deneylerde kullanılan cihazların yatırım maliyetleri Şekil 5.5’ de ve cihaz saatlik maliyetleri ise Şekil 5.6’ da verilmiştir.

Grafikler incelendiğinde tarayarak ışıkla kür tekniği ile çalışan SLA7000 model HPÜ cihazının, yatırım maliyeti en yüksek değerde olmasına karşılık, cihaz saatlik maliyetinin tahmin edilenden düşük olması dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, SLA7000 cihazında üretilen parçaların toplamda yüksek maliyetli olması nedeni ile pazar satışlarında hedefe ulaşmada zorluk çekmesi ve amortisman süresinin daha uzun değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu kapsamda değerlendirildiğinde,

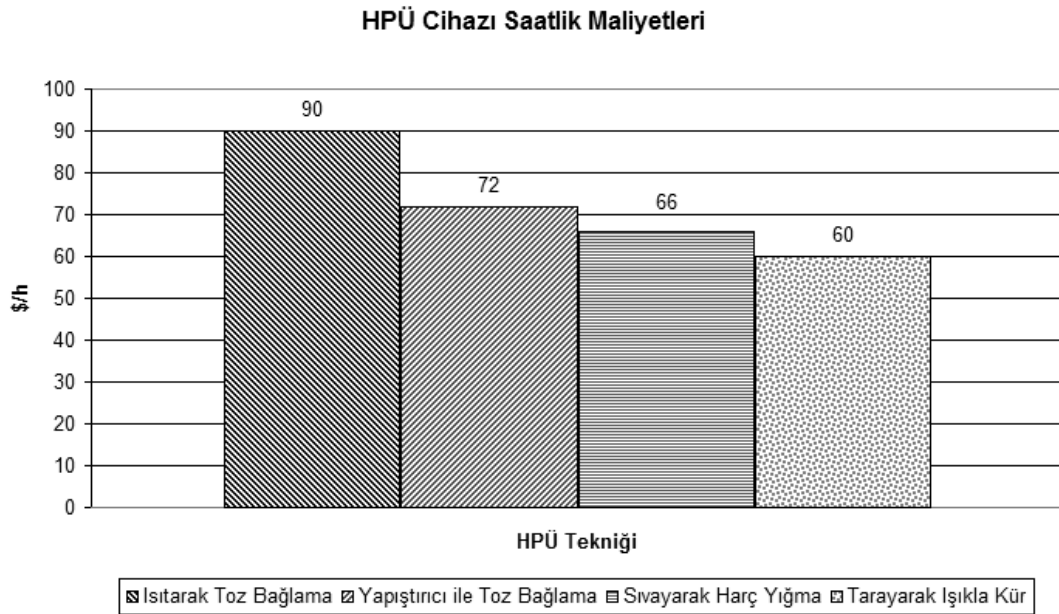
pazarda hizmete açılmış SLA7000 HPÜ cihazı bulunmaması, mali yapısı kuvvetli işletmelerin kalite gereksinimlerini karşılayabilmek amacı ile iç hizmetlerinde bu cihazı kullanmaları anlam kazanmaktadır. Deneylerde kullanılan HPÜ cihazlarının birim maliyetleri Çizelge 5.3’ de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan HPÜ cihazlarının birim maliyetleri

| HPÜ Tekniği                 | HPÜ Cihazı  | Birim Maliyet (\$/h) | Birim Maliyet (\$/min) |
|-----------------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | EOSINT P380 | 90                   | 1.5                    |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | Z310        | 72                   | 1.2                    |
| Sıvıyarak Harç Yığma        | Dimension   | 66                   | 1.1                    |
| Tarayarak Işıkla Kür        | SLA7000     | 60                   | 1.0                    |



Şekil 5.5. Yatırım maliyeti



Şekil 5.6. HPÜ cihazı saatlik maliyetleri

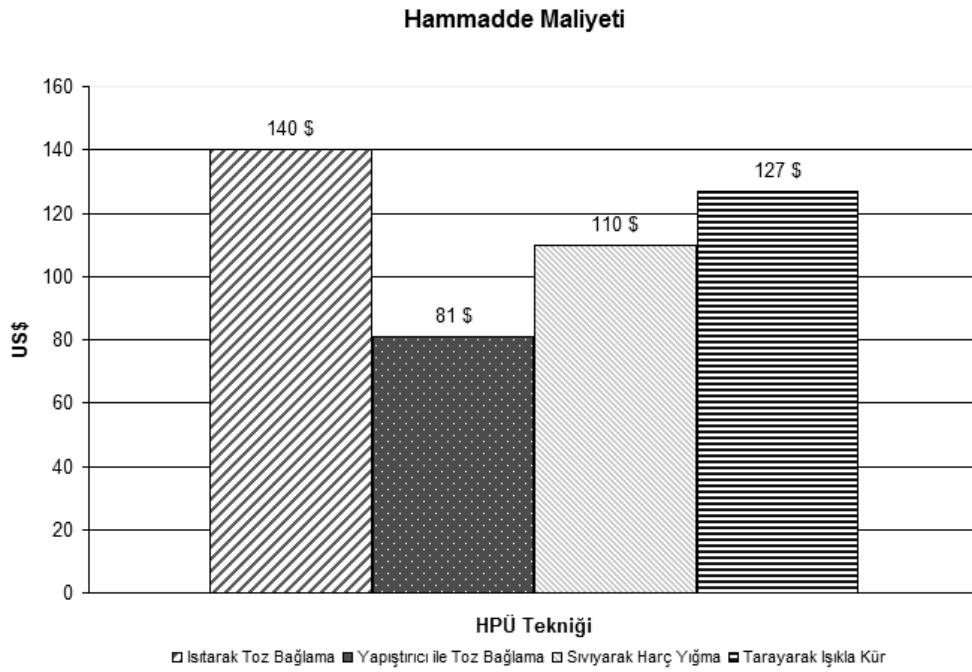
### 5.2.3. Hammadde maliyetleri

Malzeme maliyetinin birim ürüne etkisi temelde; satın alma, depolama ve tüketim miktarı kriterlerine bağlıdır. Hammadde satın alma fiyatı toptan veya parakende alımlarda farklılık gösterebilmektedir. Depolama masrafları satın alınan malzeme miktarına göre değişirken malzemelerin stoklanabilir ömürleri bu süreçte dikkate alınmalıdır. İşletmenin birim zamanda tükettiği hammadde satın alma fiyatı ve depolama giderlerini yıllık bazda planlamada ana unsuru oluşturmaktadır. İşletme idaresi bütün bu değişkenleri optimize ederek satış, pazarlama, muhasebe, finansman gibi işletme faaliyetlerinin kar zarar analizi doğrultusunda seyretmesini sağlar.

Hızlı Prototipleme cihazlarının malzeme alternatifleri oldukça fazla çeşit göstermekte olup deney modeli için seçilmiş olan ve deneylerde kullanılan malzemelerin maliyetleri kullanım miktarları sonucunda 81-140 \$ aralığında sonuç vermiştir. Çizelge 5.4’ de tablo halinde ve Şekil 5.7’de grafik halinde hammadde maliyetleri görülmektedir.

Çizelge 5.4. Deneylerde sarf edilen miktarda hammadde maliyetleri

| HPÜ Tekniği                 | Hammadde          | Tüketim Miktarı    | Maliyeti (\$) |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | PA2200            | 106 gr             | 140           |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | ZB63              | 118 gr             | 81            |
| Sıvıyarak Harç Yığma        | ABS P400          | 32 m               | 110           |
| Tarayarak Işıklı Kür        | Somos 14120 White | 25 cm <sup>3</sup> | 127           |



Şekil 5.7. Hammadde maliyetleri

#### 5.2.4. Toplam maliyet

İşçilik, işletme ve cihaz maliyetleri, hammadde başlıkları altında değerlendirilen maliyetler bir araya getirildiğinde toplam ürün maliyetini vermektedir. İşletme karları ve vergiler gibi konum ve yapıya göre farklılıkları değişken olan etmenler değerlendirme dışında bırakılmıştır. Bölüm 4’de belirlenen hesaplama yöntemi kullanılarak deney modelinin toplam maliyeti Çizelge 5.5’deki gibi hesaplanmıştır.

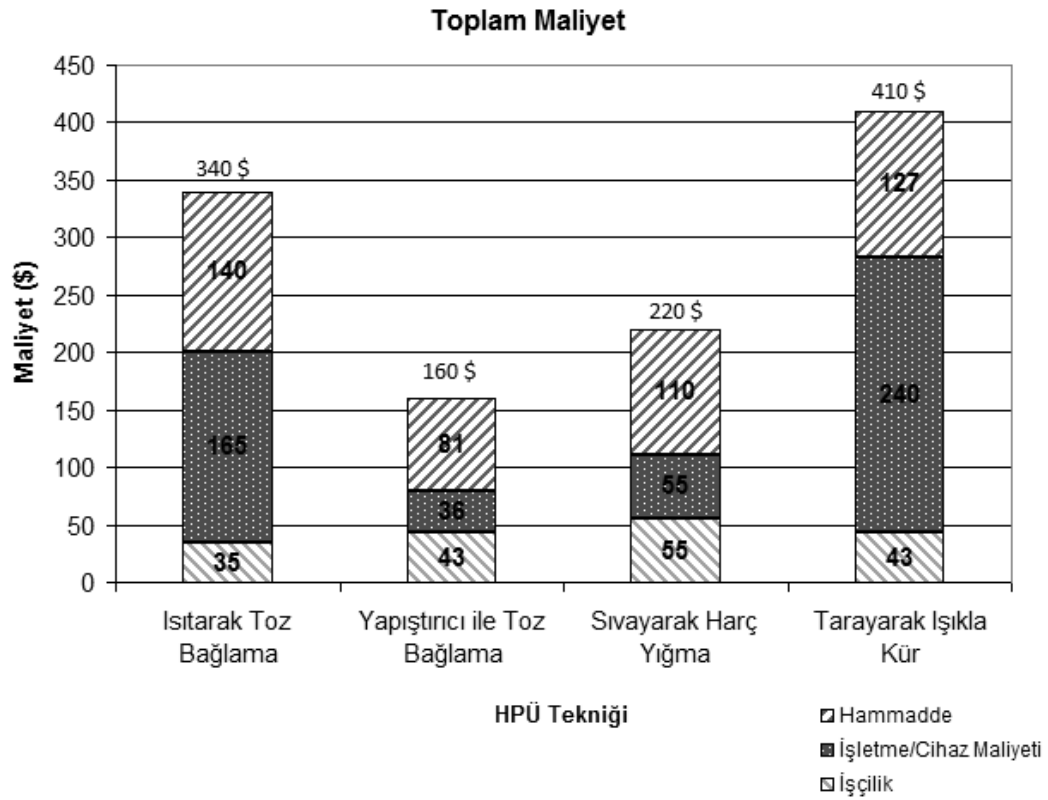
Çizelge 5.5. Toplam maliyetin hesaplanması

|                                                                                                               |                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Isıtarak Toz Bağlama</b>                                                                                   |                                                                                                                        |
| $X = A + B + C$                                                                                               |                                                                                                                        |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                                 |                                                                                                                        |
| $X = (35 \text{ min} \times 1 \text{ \$/min}) + (110 \text{ min} \times 1,5 \text{ \$/min}) + 140 \text{ \$}$ |                                                                                                                        |
| 340 \$                                                                                                        |                                                                                                                        |
| <b>Yapıştırıcı ile Toz Bağlama</b>                                                                            |                                                                                                                        |
| $X = A + B + C$                                                                                               |                                                                                                                        |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                                 |                                                                                                                        |
| $X = (43 \text{ min} \times 1 \text{ \$/min}) + (30 \text{ min} \times 1,2 \text{ \$/min}) + 81 \text{ \$}$   |                                                                                                                        |
| 160 \$                                                                                                        |                                                                                                                        |
| <b>Sıvayarak Harç Yığma</b>                                                                                   |                                                                                                                        |
| $X = A + B + C$                                                                                               |                                                                                                                        |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                                 |                                                                                                                        |
| $X = (55 \text{ min} \times 1 \text{ \$/min}) + (50 \text{ min} \times 1,1 \text{ \$/min}) + 110 \text{ \$}$  |                                                                                                                        |
| 220 \$                                                                                                        |                                                                                                                        |
| <b>Tarayarak Işıkla Kür</b>                                                                                   |                                                                                                                        |
| $X = A + B + C$                                                                                               |                                                                                                                        |
| $X = [(a) \times (b)] + [(c) \times (d)] + C$                                                                 |                                                                                                                        |
| $X = (43 \text{ min} \times 1 \text{ \$/min}) + (240 \text{ min} \times 1 \text{ \$/min}) + 127 \text{ \$}$   |                                                                                                                        |
| 410 \$                                                                                                        |                                                                                                                        |
| X – Toplam Ürün Maliyeti<br>A – İşçilik<br>B – Cihaz Birim Maliyeti<br>C – Hammadde Maliyeti                  | a – İnşa Öncesi /Sonrası Süreler Toplamı<br>b – Personel Birim Maliyeti<br>c – İnşa Süresi<br>d – Cihaz Birim Maliyeti |

Deney modelinin toplam üretim maliyetleri Çizelge 5.6' da tablo halinde ve Şekil 5.8' de grafik olarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.6. Toplam Maliyet

| HPÜ Tekniği                 | Cihaz     | Toplam Maliyet (\$) |
|-----------------------------|-----------|---------------------|
| Isıtarak Toz Bağlama        | EOS P380  | 340                 |
| Yapıştırıcı ile Toz Bağlama | Z310      | 160                 |
| Sıvayarak Harç Yığma        | Dimension | 220                 |
| Tarayarak Işıklı Kür        | SLA7000   | 410                 |

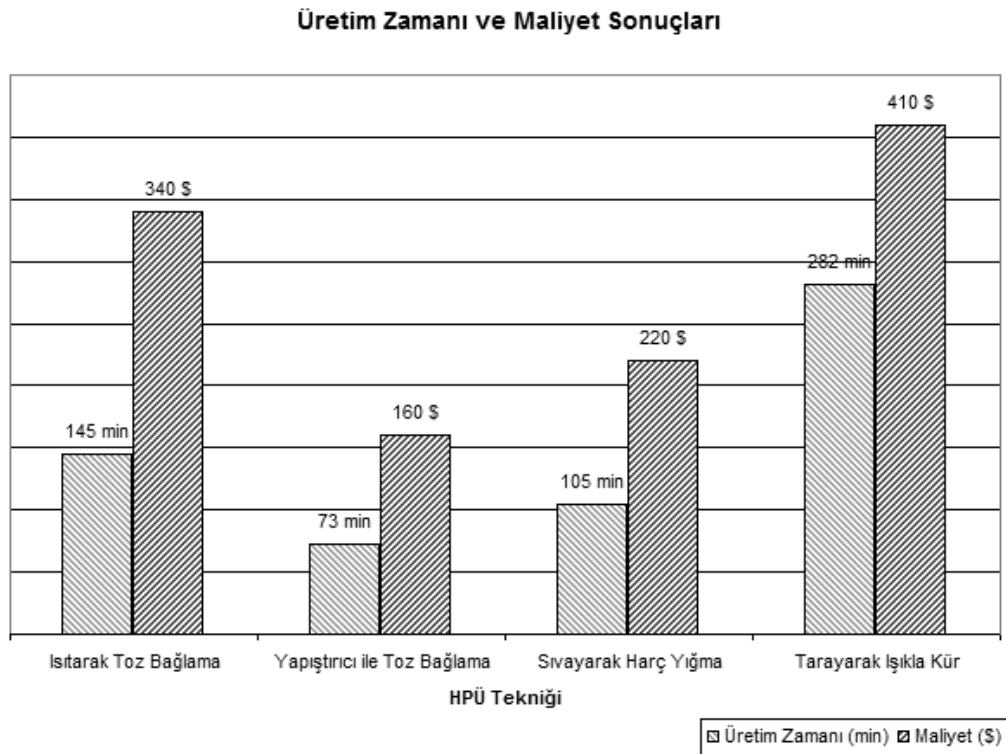


Şekil 5.8. Toplam maliyet

Şekil 5.8' de verilen prototip üretim maliyeti grafiğine bakıldığında, deney modelinin Z310 tezgahında 160 \$, Dimension tezgahında 220 \$, EOSP380 tezgahında 340 \$ ve SLA7000 tezgahında 410 \$ maliyet ile üretildiği görülmektedir.

Kalite unsurları ve üretim zamanı değerlendirme dışında tutulduğunda, bir başka deyişle maliyet öncelikli seçim yapılması söz konusu olduğunda 160 \$ maliyet ile deney modelinin üretilebilmesini sağlamış olan, yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile çalışan Z310 model HPÜ cihazı tercih sebebi olmaktadır.

Toplam maliyetler, toplam üretim zamanları ile bir arada değerlendirildiğinde, yine yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği ile çalışan Z310 model HPÜ cihazı en düşük ürün maliyeti ve en kısa üretim süresini sergileyerek kalite gereksinimlerinden bağımsız değerlendirildiğinde tercih sebebi olmaktadır. En yüksek ürün maliyeti ve üretim süresini sergileyen, tarayarak ışıkla kür tekniği ile çalışan SLA7000 model HPÜ cihazı ise, olası yüksek maliyet ve zaman değerlerini karşılayacak nitelikte, üretilebilirlik ve kalite gereksinimleri taşıyan parçalar dışında tercih edilmekten uzakta kalmaktadır. Şekil 5.9’ da ki grafiklerde üretim zamanı ve maliyet sonuçları bir arada verilmiştir.



Şekil 5.9. Üretim zamanı ve maliyet sonuçları

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hızlı prototip üretimi teknolojilerinde üretim zamanı ve maliyetler endüstriyel uygulamalarda önemli bir konum teşkil etmektedir. Bu önem, gelişmekte olan teknoloji ile değişim gösteren endüstrinin zaman ve maliyet kayıplarını en alt seviyede tutma ihtiyacından doğmaktadır. Ar-Ge ve üretim sistemlerinde iyileştirme amaçlı yapılan çalışmalar HPÜ teknolojilerinden daha hızlı ve düşük maliyetli faydalanma yönünde ilerlemektedir. Hızlı prototipleme tekniklerinden, dünyada ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan 4 farklı tekniğin üretim zamanı ve maliyet açısından incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

❖ Yapıştırıcıyla toz bağlama tekniği en kısa üretim zamanını ve en düşük maliyeti sağlamış, ısıtarak toz bağlama tekniği nispeten yüksek üretim zamanı ve maliyet sergilerken, sıvayarak harç yığma tekniğinde üretim zamanı ve maliyet biraz daha artmış, tarayarak ışıkla kür tekniği ise en uzun üretim zamanı ve en yüksek maliyeti sergilemiştir.

❖ Üretim zamanındaki artışa paralel olarak, maliyet de artmaktadır. Üretim zamanını belirleyici etkiler içerisinde inşa edilen modelin üretilebilirlik unsurları ve kullanılan HPÜ cihazının teknik özellikleri ön sırada yer almaktadır. Maliyeti belirleyici etkiler içerisinde, üretim zamanının yanında, kullanılan miktar doğrultusunda hammadde maliyeti, işçilik giderleri ve işletme idari masrafları ile cihaz yatırım maliyetleri ağırlıklı olarak yer almaktadır.

❖ İşçilik etkeninin doğrudan etkili olduğu, inşa öncesi ve sonrası işlem süreçleri üzerinde derinlemesine yapılacak çalışmalar, üretim zamanı ve dolayısı ile maliyet unsurlarında iyileşme sağlayacaktır. Ayrıca, bu süreçler operatör yeteneği gerektirmesi nedeni ile elde edilecek veriler, personel eğitimleri için kaynak teşkil edebilecektir. Araştırmalar sonucu sunulacak bilgilerin işçilikte iyileşme sağlaması, üretim zamanı ve maliyet dışında üretilebilirlik kriterlerini de iyileştirerek HPÜ cihazlarını daha verimli kullanma yönünde fayda sağlayacaktır.

❖ HPÜ cihazlarında üretilen parçaların daha geniş kullanım alanına sahip olabilmesi, cihaz teknik özelliklerinin yanı sıra hammadde teknik özellikleriyle de ilişkilidir. Söz konusu kullanım alanlarını yaygınlaştırmak, üretilebilirlik ve maliyet unsurlarında iyileştirme sağlar.

❖ Prototip üretimi gerektiren çalışmalarda, HPÜ teknolojileri prototipin üzerinde taşıdığı üretilebilirlik kriterleri de değerlendirildiğinde geleneksel ve geleneksel olmayan üretim yöntemlerine göre daha verimli üretim zamanı ve maliyet sonuçları verdiği bilinmektedir. HPÜ teknolojileri arasındaki üretilebilirlik kriterleri uygun HPÜ cihazını seçmede önemli bir etkidir. Bu seçimi tamamlayacak diğer etkenler ise bu çalışmanın konusu olan üretim zamanı ve maliyet etkenleridir.

Yapılan bu değerlendirmeler ışığında, HPÜ konusunda yapılabilecek çalışmaları geliştirmek amacı ile aşağıdaki öneriler getirilebilir.

- Gelişen teknolojiye paralel olarak, HPÜ cihazı seçiminde dikkat edilen unsurlar da gelişme göstermektedir. Bu unsurlar üzerinde yapılacak olan araştırma ve deneysel çalışmaların devamlılığı, teknolojiden faydalanma kapsamında karşılaşılabilecek eksikliklerin giderilmesini sağlayacaktır. Kalite ve üretilebilirlik konusunda üst düzey sonuçlar veren cihazlar üzerinde bu araştırma ve deneysel çalışmaların yapılması sunulabilecek başlıca öneridir.
- HPÜ cihazlarında kullanılan hammaddeler geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Farklı hammaddeler üzerinde karşılaştırmalı araştırmalar yapılması, üretimlerin hedeflenen sonuca ulaşmasına fayda sağlayacaktır. Tasarlanan modelin kullanımına uygun hammadde seçimi ve üretimin ön görülen uygunlukta tamamlanabilmesi için hammadde teknik özellikleri arasındaki farklılıkların yanı sıra üretim süreçlerine etkileri de inceleme konusu olarak değerlendirilebilir.
- Prototip ihtiyacını karşılamak amacı ile kullanılacak HPÜ cihazı seçimi yapıldığında, tespit edilen cihazda parça üretiminde kullanılacak hammaddenin seçimi, üretim sonucunu etkileyen kriterler arasındadır. Belirlenmiş bir HPÜ

cihazında kullanılabilecek farklı hammadde alternatifleri arasında karşılaştırmalı araştırmalarda bulunmak ve hammadde seçiminin varılacak sonuca etkisini incelemek araştırma konusu olarak önerilebilir.

- HPÜ teknolojilerini verimli kullanmak, HPÜ cihazlarında üretilen parçaların çok çeşitli alanlarda kullanılabilmesini sağlamak amacı ile, farklı teknik özelliklere sahip hammadde geliştirme çalışmaları, değerli bir çalışma konusudur.
- HPÜ cihazlarının veri girdisi olarak kullanılan arayüz formatlarında yapılacak iyileştirme çalışmaları, format dönüşümlerinde karşılaşılabilecek hata ve eksikliklerin giderilmesine ve üç boyutlu tasarımın fiziksel kayıp olmadan üretilbilmesine olanak sağlayacaktır.
- Üretim öncesi yapılması gerekli ön işlemlerin başarılı hazırlanması üretim sonucuna doğrudan etkilidir. Ön hazırlık işlemlerinde en etkili nokta, destek yapısı tasarımı ve katman inşa çevrimindeki yol optimizasyonudur. Destek yapısı ve yol optimizasyonu konularında yapılacak araştırmalar üretim zamanı başta olmak üzere maliyet ve üretilbilirlik kriterlerini geliştirecek öneriler arasındadır.

## KAYNAKLAR

1. Apak, S., Korkut İ., Dündar, K., “Hızlı Prototipleme Tezgahlarında Üretilen Parçaların Maliyet Araştırması” **4. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Konya, (2): 581-590 (2005).
2. Özüğür, B., Korkut, İ., Şeker, U., “Kompleks Yapıdaki Parçaların Üretiminde Hızlı Prototipleme Teknikleri İle Geleneksel Ve Geleneksel Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması” **4. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Konya, (1): 581-590 (2005).
3. Özüğür, B., “İleri İmalat Teknolojileri”, Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı**, Ankara, 32-144 (2002).
4. Öztürk, O., “Hızlı Prototipleme ve Üretim” **DES&TECH Tasarım ve Teknoloji Dergisi**, 1:32-45 (2003).
5. Grimm, T., “User’s Guide to Rapid Prototyping”, **Society of Manufacturing Engineers**, USA, 24-345, (2004).
6. Sachs, E., Cima, M., Williams, P., Brancazio, D., Cornie, J., “Three Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly From a CAD Model”, **Journal of Engineering for Industry**, 114, 481-488 (1990).
7. Jacobs, P. F., “Rapid Prototyping & Manufacturing : Fundamental of StereoLithography, First Edition”, ISBN:0-07-032433-6, **Society of Manufacturing Engineers McGraw-Hill Inc.**, Dearborn Michigan, 1-434 (1992).
8. Bertsch, A. Bernhard, P. Vogt, C. Renaud, P. “Rapid prototyping of small size objects”, **Rapid Prototyping Journal**, MCB University Press, 6(4):259-266 (2000).
9. Erten, M., Yağmur, L., “Hızlı Prototip Üretim Teknolojileri” **Makine ve Metal Dergisi**, 67:76-97 (1997).
10. Jamieson, R., Holmer, B., Ashby A., “How Rapid Prototyping can Assist in the Development of New Orthopadeic products”, **Rapid Prototyping Journal**, MCB University Press, 1(4):38-41 (1995).
11. İnternet: “Microstereolithography”, Swiss Federal Institute of Technology, <http://dmts.un.epfl.ch/~abertsch/album.html> (2000).
12. Burns M., “Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing”, ISBN 0-13-119462-3, **Prentice Hall**, Chigago, 140-369 (1993).

13. Crump, S.S., "Direct Rapid Manufacturing With Real Production Plastics Using Fused Deposition Modelling (FDM)", ***Presented at the 4th annual Euro-uRapid Conferance***, Frankfurt, 354-357 (2002).
14. Springer, A.M., "Application of Rapid Prototyping Methods to High-Speed Wind Tunnel Testing". ***Marshall Space Flight Center Director's Discretionary Fund Final Report***, Marshall Space Flight Center, NASA/TP-1998-208396, 96-21 (1998).
15. Bellini, A. Güçeri, S., "Mechanical Characterization of Parts Fabricated Using Fused Deposition Modeling", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, MCB University Press Limited, 9(4):252-264 (2003).
16. Guancghun, W. Huiping, L. Yanjin, G. Guoqun, Z., "A Rapid Design and Manufacturing System for Product Development Applications", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, Emerald Group Publishing Limited, 10(3):200-206 (2004).
17. Mahesh, M. Wong, Y.S. Fuh, Y.H. Loh, H.T., "Benchmarking for Comparative Evaluation of RP System and Process", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, Emerald Group Publishing Limited, 10(2):123-135 (2004).
18. Li, W. Xu, S. Zhao , G., "Manufacturable surface reconstruction from complex contours" , ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, Emerald Group Publishing Limited, 10(2):114-122 (2004).
19. Zhengyu , Z. Yucheng, D. Jun, H. "A New Hollowing Process for Rapid Prototype Models" , ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, Emerald Group Publishing Limited, 10(3):166-175 (2004).
20. Hopkinson, N. Dickens P., "Rapid Prototyping for Direcct Manufacture", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, MCB University Press Limited, 7(4):197-202 (2001).
21. Knitter, R. Bauer, W. Göhring, D. Risthaus, P., "Rapid Prototyping Process Chains for Ceramic Microcomponents", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, MCB University Press Limited, 8(2):76-82 (2002).
22. Stucker, B. Xiuzhi, Q., "A Finish Machining Strategy for Rapid Manufactured Parts and Tools", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, MCB University Press Limited, 9(4):194-200 (2003).
23. Evans, A.M. Campbell, I.A. A., "Comparative Evaluation of Industrial Design Models Produced Using Rapid Prototyping and Workshop-based fabrication Techniques", ISSN 1355-2546, ***Rapid Prototyping Journal***, MCB University Press Limited, 9(5):344-355 (2003).

24. Ippolito, R., Luliano, L., Gatto, A., “Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish”, *Annals of the CIRP*, McGrawHill, 44 (1995).
25. Grimm T, “Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes”, ISSN 1355-2546, *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Publishing Limited, 10(2):123-135 (2003).
26. Özüğür, B., “Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks ve Mikro Yapıdaki Parçaların Üretilirliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Ana Bilim Dalı*, ANKARA, 32-144 (2002).
27. Uysal, H., “Hızlı Prototip Üretimi” Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilimdalı İmal Usulleri Programı*, İstanbul, (2000).
28. Erten, M., Yağmur, L., “Stereolitography (SL) ve Fused Deposition Modeling (FDM) Metotlarının Uygulaması ve Karşılaştırılması” *Makinatek Dergisi*, 39:20-24 (1998).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : APAK, Serhat  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 07.02.1982, BURSA  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0312 3858545  
 e-mail : [serhatapak@gmail.com](mailto:serhatapak@gmail.com)

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi                                    | Mezuniyet tarihi |
|--------|--------------------------------------------------|------------------|
| Lisans | Gazi Üniversitesi / TEF<br>Makine Eğitimi Bölümü | 2002             |
| Lise   | Bursa Tophane Teknik Lisesi<br>Makine Bölümü     | 1998             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                                                          | Görev              |
|-----------|--------------------------------------------------------------|--------------------|
| 2009-     | Robust Elektronik Yazılım<br>Danışmanlık San. Tic. Ltd. Şti. | Firma Ortağı       |
| 2006-2009 | Odak Baskılı Devre<br>San. Tic. Ltd. Şti.                    | Bölge<br>Sorumlusu |
| 2002-2006 | Netdevre A.Ş.                                                | Satış Müdürü       |

### Yabancı Dil

İngilizce

**Yayınlar**

1. Apak, S., Korkut, İ., Dünder, K., “Hızlı Prototipleme Tezgahlarında Üretilen Parçaların Maliyet Araştırması” *4. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Konya, (2): 581-590 (2005).

**Hobiler**

Amatör fotoğrafçılık, yüzme, müzik.