

**HIZLI PROTOTİPLEME TEKNİKLERİ İLE KOMPLEKS YAPIDAKİ
PARÇALARIN ÜRETİLEBİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Burhan ÖZUĞUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2006

ANKARA

Burhan ÖZUĞUR tarafından hazırlanan HIZLI PROTOTİPLEME TEKNİKLERİ ile KOMPLEKS YAPIDAKİ PARÇALARIN ÜRETİLEBİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İhsan KORKUT
Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Makine Eğitimi Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Üye : Prof. Dr. Faruk MENDİ

Üye : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Üye : Doç. Dr. Halil ARIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. İhsan KORKUT

Tarih : 17 / 05 / 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Burhan ÖZUĞUR

HIZLI PROTOTİPLEME TEKNİKLERİ ile KOMPLEKS YAPIDAKİ PARÇALARIN ÜRETİLEBİLİRLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Burhan ÖZUĞUR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2006

ÖZET

Bu çalışma; günümüz dünyasında mevcut ve aktif olarak kullanılan alışılmış imalat tekniklerinin dışında kalan ve günümüzde prototip üretiminde tercih edilen Hızlı Prototip Üretimi tekniklerinin kıyaslanması ile prototipi üretilecek parça için uygun yöntemin tespit edilmesini, sonrasında tespit edilen yöntem ile üretilmiş prototipin model dönüşüm teknolojileri ile endüstride direkt üretimde kullanılabilecek bir model statüsüne sahip olmasını kapsamaktadır. Çalışmanın bu kapsam dahilinde olabilmesi için öncelikle, Hızlı Prototip Üretimi cihazlarında inşası gerçekleştirilecek olan parça titizlikle araştırılıp, üzerinde çalışmanın amacına ulaşmasını tam olarak karşılayan unsurlar içeren bir model seçilmiştir. Model seçiminden sonraki aşama olarak, çalışma kapsamında seçilen modelin, endüstride yaygın olarak tercih edilen ve teknolojik yeterlik bakımından üstün nitelikler taşıyan dört farklı Hızlı Prototip Üretimi cihazında inşa işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm modellerin inşa süreci bitiminde elde edilen bulgular analiz edilerek sonuçlar bu çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Yapılan bu çalışmaya ek olarak, üretilen bir prototipin farklı materyallere dönüşümünü sağlayan model dönüşüm teknolojileri üzerinde de durulmuş ve bu teknolojilerin seçimi konusu bu çalışma bünyesinde hedeflenen amaç kapsamına dahil edilmiştir. Sonuç olarak çalışma kapsamı bakımından incelendiğinde, ülkemiz ve uluslararası endüstrilerinin büyük sıkıntıları arasında yer alan kompleks unsurlara sahip parçaların üretilebilirliğinin hangi sistemler dahilinde gerçekleştirilebileceği incelenmiş ve bu çalışma dahilinde imalat endüstrisine sunulmuştur.

Bilim Kodu : 708.1.140

Anahtar Kelimeler : Hızlı Prototip Üretimi, Üretilebilirlik, Hassas Döküm, Silikon Kalıplama

Sayfa Adedi : 104

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. İhsan KORKUT

**THE INVESTIGATION OF MANUFACTURABILITY OF PARTS HAVING
COMPLEX STRUCTURE BY RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES**

(M.Sc. Thesis)

Burhan ÖZUĞUR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2006

ABSTRACT

In this study, compare evaluation to existing and active employed out of traditional manufacturing techniques and Rapid Prototyping techniques chosen for prototype manufacture on contemporary world and on the other hand, this study included to determine eligible method for produce will manufacture prototype and than prototype manufactured with determined method have to status of direct using on industry with model conversion technologies. This study can be the scope an article, firstly, research to produce built up to Rapid Prototyping machine so chosen a model to answer expectations for aim of study. After the model chosen stage, built up to chosen model on the four different types Rapid Prototyping machines which have excellent characters and generally prefer on industry. End of the all models' build up process, analyze to obtained invention and results included this study. Add to executed study, dwell upon model conversion technologies which providing conversion to different material for manufactured prototype and than case of these technologies selection include to scope to target aim of study. As a result analyze to study in the scope manufacturability of produces have complex and micro dimensional factors can executed on which systems are analyzed and included this study to perform manufacturing industry.

Science Code : 708.1.140

**Key Words : Rapid Prototype Manufacture, Manufacturability,
Quick casting, Silicon Molding**

Page Number : 104

Advisor : Yrd. Doç. Dr. İhsan KORKUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. İhsan KORKUT' a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER' e, üniversite öğrenciliğim boyunca Hızlı Prototipleme Teknolojileri konusu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım sayın Erkut NEĞİŞ' e, endüstriyel uygulamalar konusunda tecrübelerinden faydalandığım değerli ağabeyim İrfan TURAN BAŞBUĞ ve değerli öğretmenim Latif KARA' ya, manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili arkadaşım Serhat APAK' a, kalbimi aydınlatarak gelişimimi sağlayan ve hayat boyu yanımdan ayrılmayarak ayakta durmamı sağlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. HIZLI PROTOTİP ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ.....	11
3.1. Hızlı Prototip Üretimi	11
3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan HPÜ Teknolojileri.....	14
3.2.1. Isıtarak toz bağlama HPÜ tekniği (SLS)	14
3.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ tekniği	24
3.2.3. Sıvayarak harç yığma HPÜ tekniği (FDM)	26
3.2.4. Tarayarak ışıkla kür HPÜ tekniği (SLA)	30
3.3. Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri Uygulama Sahaları.....	43
3.3.1. Kavramsal modelleme uygulamaları	43
3.3.2. Fonksiyonel prototipleme uygulamaları	44
3.3.3. Direkt döküm kalıbı üretimi.....	45
3.3.4. Hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretimi.....	46
3.3.5. Analiz ve test uygulamaları	46

	Sayfa
3.3.6. Hızlı kalıp imalatı uygulamaları	48
3.3.7. Doğrudan imalat uygulamaları	54
3.3.7. Medikal uygulamalar	56
3.3.8. Kuyumculuk uygulamaları.....	64
3.3.9. Matematik, fizik ve kimya uygulamaları	65
3.3.10. Sanat uygulamaları.....	67
3.3.11. Mimari uygulamalar.....	67
4. MODEL DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ.....	68
4.1. Hassas Döküm Teknolojisi	68
4.1.1. Hassas kabuk döküm (Investment Shell Casting).....	69
4.1.2. Hassas fanus döküm (Investment Flask Casting)	73
4.2. Silikon Kalıplama Teknolojisi	76
5. MATERYAL VE YÖNTEM	81
5.1. Deney Modeli Seçimi.....	81
5.2. Değerlendirme Kriterleri.....	83
5.3. Deney Kapsamında Kullanılan HPÜ Teknikleri ve Cihazları	84
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	86
6.1. Üretilbilirlik Kriterleri.....	86
6.2. Ölçü Tamlığı	91
6.3. Yüzey Kalitesi ve Hassasiyeti.....	92
6.4. Üretim Zamanı	95
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	104

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. DuraForm PA ve DuraForm GF malzemelerinin tipik karakteristik özellikleri	17
Çizelge 3.2. Somos 201 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	18
Çizelge 3.3. ST 100 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	20
Çizelge 3.4. Polistiren inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	21
Çizelge 3.5. PA 2200 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	22
Çizelge 3.6. EOSINT P380 model HPÜ cihazı teknik özellikleri	23
Çizelge 3.7. ZPrinter 310 model HPÜ cihazı teknik özellikleri	26
Çizelge 3.8. ABS P400 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	29
Çizelge 3.9. Dimension 3D Printer model HPÜ cihazı teknik özellikleri	30
Çizelge 3.10. Somos 14120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	37
Çizelge 3.11. Somos 10120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	38
Çizelge 3.12. Somos 9120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	39
Çizelge 3.13. RenShape SL7560 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	40
Çizelge 3.14. RenShape SL5510 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri	41
Çizelge 3.15. 3D SYSTEM SLA 7000 model HPÜ cihazı teknik özellikleri	42
Çizelge 5.1. Hızlı prototipleme teknolojilerine sahip cihazların inşa yöntemlerine göre dağılım	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. HPÜ sisteminde genel aşamalar.....	11
Şekil 3.2. STL Formatına çevrilmiş bir yüzey	12
Şekil 3.3. Örnek bir STL dosyası	13
Şekil 3.4. HPÜ teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması	14
Şekil 3.5. SLS HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model	15
Şekil 3.6. EOSINT Cihazıyla inşa tekniğinin aşamaları	23
Şekil 3.7. Yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model	25
Şekil 3.8. Sıvayarak harç yığma HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model	27
Şekil 3.9. Tarayarak Işıklı Kür HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model	31
Şekil 3.10. Zephyr sıvı yayma tekniği	32
Şekil 3.11. Polimerler.....	34
Şekil 3.12. Fotopolimerler	34
Şekil 3.13. Işıklı çapraz bağlanma (Photocrosslinking)	34
Şekil 3.14. Rapid Tool tekniği safhaları	49
Şekil 3.15. HPÜ teknolojisinin medikal uygulama safhaları	56
Şekil 3.16. İmplant delme kılavuzlarının imalatı safhaları	59
Şekil 3.17. Bioplotter implant uygulaması iş akışı	61
Şekil 3.18. 3D verisine bağlı olarak yeniden kulak protezi inşası	62
Şekil 3.19. Mücevher tasarım ve imalat uygulamasının aşamaları	65
Şekil 3.20. Fermat'ın son teoremi ve bu teoremde $n = 5$ olduğu durumda oluşan yüzeyin SLA ile inşa edilen modeli.....	65
Şekil 4.1. Hassas kabuk döküm işleminin safhaları	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Direkt kabuk imalatıyla döküm tekniğinin safhaları	73
Şekil 4.3. Hassas fanus döküm işleminin safhaları	74
Şekil 4.4. Silikon kalıplama işleminin safhaları	78
Şekil 5.1. Geliştirilen deney modeli ve üzerinde bulunan kompleks unsurlar.....	82
Şekil 5.2. Türkiye’de yerleşik HPÜ tezgahlarının inşa yöntemlerine göre yüzdelik dağılımı.....	85
Şekil 6.1. Deney modeli üzerinde üretilebilirlik kriterleri incelenen unsurlar.....	87
Şekil 6.2. Mutlak sapma değerleri grafiği.....	91
Şekil 6.3. Düzlemsel yatay yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği	93
Şekil 6.4. Düzlemsel dikey yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği	94
Şekil 6.5. Açısal formlu yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği	94
Şekil 6.6. Üretim zamanı grafiği	96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. HPÜ sitemlerinde kullanılan destek yapıları	14
Resim 3.2. EOSINT P380 HPÜ cihazı	23
Resim 3.3. EOSINT cihazıyla inşa edilen örnek parçalar.....	24
Resim 3.4. Z-Corp, Z310 HPÜ cihazı	25
Resim 3.5. Z-Corp. Z310 HPÜ cihazı ile inşa edilen prototip örnekleri	26
Resim 3.6. FDM Tekniği ile Water Works destek malzemesi kullanılarak inşa edilen mekanizma	28
Resim 3.7. Stratasys, Dimension HPÜ cihazı	29
Resim 3.8. FDM HPÜ tekniği ile inşa edilen örnek parçalar	30
Resim 3.9. Bitumen of Judea (Nicephore, Fransa, 1826)	33
Resim 3.10. 3D System, SLA 7000 HPÜ cihazı	41
Resim 3.11. SLA HPÜ tekniği ile üretilmiş örnek parçalar	42
Resim 3.12. HPÜ Teknolojisiyle inşa edilmiş motor modeli	43
Resim 3.13. Farklı HPÜ teknikleri kullanılarak inşa edilmiş fonksiyonel prototipler	44
Resim 3.14. Porsche firması tarafından geliştirilen bir motora ait HPÜ prototipi	45
Resim 3.15. Z Cast prosesi ile elde edilmiş döküm kalıbı	45
Resim 3.16. Hassas döküm tekniği ile üretilen metal parça ve prototipler	46
Resim 3.17. Jet türbini optik gerilim analizi uygulaması	48
Resim 3.18. Direkt metal kalıp imalatı ile üretilen kalıp örnekleri	50
Resim 3.19. Takviyeli fotopolimer reçinesiyle ile imal edilmiş kalıplar	50
Resim 3.20. HPÜ tekniği ile inşa edilmiş enjeksiyon kalıbı	51
Resim 3.21. SLA tekniği ile inşa edilmiş mum basma kalıbı	51
Resim 3.22. HPÜ teknikleri ile inşa edilmiş kompleks yapıli kum döküm kalıbı maçası	52

Resim	Sayfa
Resim 3.23. Harvard üniversitesi'nde yürütülen bir proje çerçevesinde imal edilen kalıp	52
Resim 3.24. SLA tekniği ile inşa edilmiş modeller kullanılarak hassas döküm ile imal edilmiş plastik enjeksiyon kalıpları	53
Resim 3.25. Oyuncak otomobil modeli	53
Resim 3.25. Oyuncak otomobil modeli	54
Resim 3.26. Yüksek performanslı seramik filtreler	55
Resim 3.27. HPÜ teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen ilaç kapsülleri imalatı	55
Resim 3.28. Bir enjektör iğnesinin içine girebilecek kadar küçük motor , mekanizmalar ve denizaltı	56
Resim 3.29. Ameliyat planlamasında kullanılmış beyin ve kafatası modelleri	57
Resim 3.30. Ameliyat planlamasında kullanılmış kafatası modelleri	57
Resim 3.31. Ameliyat planlamasında kullanılmış çene ve yüz modelleri	58
Resim 3.32. Diş doğrultma kılıfı (Aligner) örneği	59
Resim 3.33. HPÜ teknolojisi ile diş protezi imalatı ve inşa edilen mum model	60
Resim 3.34. HPÜ teknolojisi ile kağıt ve yapıştırıcıdan imal edilmiş bir insan kemiği modeli	60
Resim 3.35. Özürlü bir Ayağın SLA ile inşa edilmiş modeli	60
Resim 3.36. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mikro denizaltı	64
Resim 3.37. Helisys firmasının HPÜ cihazlarıyla inşa edilen bir molekül modeli, ve topografik bir model	66
Resim 3.38. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mobius bantlarının bir hali	66
Resim 3.39. SLA teknolojisi ile inşa edilmiş Fraklat ağacı ve Klein şişesi	66
Resim 3.40. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş Nucleosome ve Lysozyme modeli.....	66
Resim 3.41. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş sanatsal modeller	67
Resim 3.42. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mimari modeller	67

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Modern bir hassas kabuk döküm fabrikası	71
Resim 4.2. Askeri elektronik cihazların kasaları ve jet türbin parçalarından örnekler	72
Resim 4.3. Seramik tozu kullanılarak imal edilmiş bir hassas döküm kalıbı ve kesiti	73
Resim 4.4. MCP Metal Part Casting sisteminin uygulama safhaları	75
Resim 4.5. MCP Metal Part Casting sistemine örnek bir çalışma	76
Resim 4.6. Silikon kalıplama işlemi uygulama örneği	79
Resim 4.7. Silikon kalıp kullanımına dair örnekler	80
Resim 4.8. Silikon kalıplarına vakum altında dökümün yapıldığı sistem	80
Resim 6.1. SLA 7000 HPÜ cihazında üretilen model ve unsurları	88
Resim 6.2. Z-Corp Z310 ve EOS P380 HPÜ cihazlarında üretilen modeller ve unsurları	89
Resim 6.3. Dimension HPÜ cihazlarında üretilen modeller ve unsurları	90
Resim 6.4. Stereo Mikroskop ile 10X büyütülmüş yüzey görüntüleri	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
Ür-Ge	Ürün Geliştirme
HPÜ	Hızlı Prototip Üretimi
RP	Rapid Prototyping
CMM	Coordinate Measuring Machine
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
EDM	Electrical Discharge Machining
RTM	Resin Transfer Method
UV	Ultra Violet
3B	3 Boyutlu
CT	Computer Tomography
MR	Magnetic Resonance
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
NASA	National Aeronautics and Space Administration
CNC	Computer Numerical Control
DTM	Direct Tooling Manufacture
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
BASS	Break Away Support System
DSPC	Direct Shell Production Casting

Kısaltmalar**Açıklama****PA**

Polyamide

GF

Glass Filled

MCP

Metal Part Casting

RTV

Room Temperature Vulcanizing

ADM

Advanced Digital Manufacturing

1. GİRİŞ

Doğa ve içinde bulundurduğu yapılar medeniyetlerin bütün safhalarında insanoğlu için en büyük kaynaklar olmuştur. Ancak insanoğlunun gereksinimleri büyüdükçe bu kaynaklar yetersiz gelmiş, bunun sonucu olarak da insanoğlu gereksinimlerini karşılayabilmek için üretim ve imalata yönelmiştir. Her geçen gün artan gereksinimler karmaşık bir yapıya bürünmüş ve geleneksel olarak tabir edilmekte olan imalat yöntemleri bu karmaşıklık karşısında çözümler üretmekte zorlanmıştır. Bu karmaşıklığı çözebilme arayışına giren insanoğlu bugün teknoloji olarak adlandırılan kavramı ortaya çıkarmıştır. Bu döngü imalat sektörüne yöneltilecek olursa üretim alanlarında yaşanan sıkıntılardan çok farklı değildir. Bu sıkıntıların en başında kompleks yapılara sahip, ölçek olarak küçük parçaların ve/veya unsurların uygun şartlara sahip olarak imalatı söz konusu olmaktadır. Bu problemin çözümünde “alışılmış imalat yöntemlerinin” aksine, gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan “alışılmamış imalat yöntemleri” olarak adlandırılan teknikler uygulanmaktadır.

Şu anda üretim açısından sahip olunan teknolojik olanaklar göz önüne alındığında, bilimsel şartları içerisinde bulunduran Ar-Ge (Araştırma ve Geliştirme) ve Ür-Ge (Ürün Geliştirme) çalışmaları sonucu ortaya çıkan ve tasarımları tamamlanan parçalara ve/veya unsurlara ait deneme, test ve analizler için ihtiyaç duyulan bir prototip ürünün üretilmesi gerekliliği söz konusu olmaktadır. Normal seri üretim şartlarında kullanılan üretim sistemlerinin bu amaca hizmet etmesi yetersiz ve/veya üretim zamanları ve maliyetleri açısından verimsiz şartlar ortaya koymaktadır. Bu şartlara paralel olarak tasarlanan model veya modeller üzerinde bulunan kompleks yapıları parça ve/veya unsurlar tasarıma ait ilk prototip üretimini ve buna paralel olarak gerçek imalat şartlarını olumsuz yönde etkilemektedir. İşte bu anlam ve amaçta gereksinimleri karşılamak için geliştirme çalışmaları devam eden ve *Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri*, *HPÜ (Rapid Prototyping – RP)* olarak adlandırılan yöntemler imalat sektörünün en önemli teknolojileri arasında yer almaktadır.

HPÜ teknolojilerinde üretilmesi istenilen parçanın, öncelikle bilgisayar destekli tasarım ile bir modeli oluşturulur. Bu safhada tasarıma sıfırdan başlanılabileceği gibi hali hazırda var olan bir model veya cismin 3 boyutlu tarayıcılar (CMM – Coordinate

Measuring Machine – Üç boyutlu mekanik veya optik tarayıcılar, GOM, BRUCKHMAN, ATOS, vb.) yardımı ile taranmasıyla elde edilen veri de kullanılabilir. İmal edilmesi arzulanan parçanın tasarımı, modelin iç ve dış yüzeylerini ve sınırlarını ihtiva etmelidir. Eğer modelleme tekniği katı modelleme ise bu gerekli değildir. Yaratılan katı yada yüzey model daha sonra STL dosya formatına çevrilir. STL dosya formatı ile modelin yüzeyleri üçgenler halinde modellenir. Daha sonraki adımda üretilecek modeli belirleyen STL dosyalar sorgulandıktan sonra dilimlere ayrılır. Bu dilimler ise sistematik bir şekilde katmanlar halinde inşa edilir.

Literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular incelendiğinde, HPÜ teknolojilerindeki ilerlemeler oldukça iyi yönlü gelişmeler ve sonuçlar göstermektedir. Bu gelişmelerin sonucu olarak parçaya ait ilk prototipin hangi sistemler kullanılarak üretileceği ilk prototipin doğru sonuçlar vermesi açısından kritik bir konum içermektedir. Bu kritik konum karşısında doğru kararlara ulaşılabilmesi ancak yapılacak olan ve bilimsel çalışmalar ışığında hazırlanan, uygun laboratuvar şartlarında üretimi gerçekleştirilip gerekli test ve analizleri yapılan, bir yöneltici kaynak ile sağlanabilir. Bu gerçekler ışığında yapılan bu çalışma işte tam olarak bu amaca yönelmektedir. Bununla beraber yapılan çalışma kapsamına literatürde karşılaşılan HPÜ teknolojileri ile ilgili olarak yapılmış olan bilimsel çalışmalar eklenerek bahsedilen amaca yönelimin doğru olması sağlanmıştır.

Hedeflenen ve gerçekleştirilen amaçlar aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir;

i) Üzerinde üretilebilirliği zorlayıcı unsurlar bulunduran model seçimi ve tasarımının gerçekleştirilmesi. Ortaya çıkarılan modelin HPÜ cihazlarında inşa safhalarının gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan, modele ait ara yüzeylerin verimlilik çalışmalarının yapılması.

ii) İmalat sektöründe ve bu sektörün gelişimde büyük bir öneme sahip olan fiziksel prototip ihtiyacının geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerle üretilmeyecek kriterlere sahip parçalar bazında doğrudan veya model olarak farklı özelliklere sahip HPÜ cihazları ile inşa safhalarını gerçekleştirilmesi.

iii) Elde edilen modellerin farklı kullanım amaçlarına hitap edebilecek materyallere dönüşümünü sağlayacak en uygun şartlara sahip olan model dönüşüm teknolojilerinin incelenmesi.

Bu amaçların gerçekleştirilmesinde ilk hedef olarak belirlenen model, üzerinde kompleks yapılar içeren unsurları ihtiva etmektedir. Bu unsurların üretimi literatür çalışmaları ve teknolojinin getirdiği deneyimlerden faydalanılarak incelendiğinde, alışılmış imalat yöntemleri ve bazı alışılmamış imalat yöntemleri ile bahsedilen kompleks yapıları unsurların üretilebilirliğinin oldukça zor şartlar meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında model seçimi ve tasarımı tamamlandıktan sonra bu modele ait CAD (Computer Aided Design) dosyası STL formatına çevrilmiştir. STL formatı Materialise MagicsRP endüstriyel yazılımından faydalanılarak modele ait ara yüzeylerin verimlilik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Böylece deney modeli HPÜ cihazlarında inşa edilebilir niteliğe sahip olmuştur.

Verimlilik çalışmaları tamamlanan model günümüz HPÜ teknolojileri içerisinde yer alan dört farklı HPÜ cihazında inşa edilerek sonuçları kendi içerisinde ve diğer imalat yöntemleri bazında tartışılmıştır.

Elde edilen modeller üzerinde gerekli analiz ve testler yapılarak günümüz imalat sektöründe aktif olarak kullanılabilecek niteliklere sahip modeller bazında değerlendirilmiş ve bunun sonucu olarak doğrudan kullanılabilir nitelikler ve model dönüşüm teknikleri sonrasında kullanılabilir nitelikler çalışma kapsamında irdelenmiştir.

Sonuç olarak hedeflenen amaçlar doğrultusunda veriler elde edilerek yapılan bu çalışmanın devamında bu veriler üzerine tartışılmış ve endüstriyel uygulamalar bazında önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sach ve diğerleri bu alandaki ilk araştırmacılar olup HPÜ tekniği kullanarak bir CAD modelden doğrudan parça üretimine girişmişlerdir. Toz halindeki malzemenin katmanlar halinde çökertilmesinde 3 boyutlu yazıcı fonksiyonlarını ve tozun seçici bağlanması toza göre seçilen bağlayıcı malzemeyi püskürten bir jet sistemi kullanmışlardır [1].

Kruth ve Jacob, çalışmalarında HPÜ sistemlerini sıvı polimerizasyon, Erimiş Birikim Modelleme Yöntemi (FDM – Fused Deposition Modelling), Lamine Parça Üretim Yöntemi (LOM – Laminated Object Manufacturing), Seçici Lazer Sinterleme Yöntemi (SLS – Selective Laser Sintering) ve noktadan noktaya katılaştırma olarak sınıflandırmıştır [2-5].

Lye ve Yeong, polistrilen malzemeli koruyucu ürünlerin üretimi ve tasarımında birleşik bir teknoloji geliştirmiştir. Burada koruyucu paketleme tasarımı için veri temeline dayanan bir teknik kullanmışlardır. Polistirilen örneklerin üretiminde kalıp tasarımı ve yapımı prosesleri arasında bir bağlantı sağlamışlardır. En son çalışmalarında ise bu teknolojiyi strafor köpük ürünlerin ve kalıpların üretiminde kullanmışlardır. Aynı zamanda polistrilen kalıpların üretiminde mikro dalga enerjisini kullanmayı araştırmışlardır [6].

Ippolito ve arkadaşları, beş farklı HPÜ tekniğiyle üretilmiş HPÜ modellerini yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti konusunda karşılaştırmış ve bir HPÜ parçasının ANSI-ISO standartlarına göre kalitesini kontrol etmek için bir tezgah önermişlerdir [7].

Gruel, fonksiyonel uygulama ve testler için metalik malzemeli prototiplerin üretimine uygulanmak üzere 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 bir yeni HPÜ prosesi geliştirmiştir [6].

Williams ve arkadaşları; Gruel'in yaptığı bu çalışmanın yapım şekline etkileri, boyutsal hassasiyet performansı gibi sonuçlarını araştırmıştır. Bütün bu prototipler SLA-250 cihazı üzerinde ve SL5170 fotopolimer kullanarak gerçekleştirilmiştir [6].

Arthur, 180mm kalınlığındaki SLA numunesinin elektrolizle kaplanarak EDM (Electrical Discharge Machining) elektrotu olarak kullanılmasını sorgulamıştır. 10mm kalınlığında ince bir iletken boya bakırın çökeltilebilmesi için ara yüzey olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda SLA modellerinden elektrolizle şekil verilmiş bakır elektrotlar elde etme üzerinde çalışmışlardır. Çeşitli komponentler için elde edilmiş negatifler ve bunların boşlukları, bir SLA reçine içerisinde elektrolizle şekil vermek için master olarak kullanılmak üzere modellenmiştir [6].

Dover ve arkadaşları bir elektrolizle çökeltme prosesiyle doğrudan metal takımların üretilmesine girişmişlerdir. Bir bakır sülfat elektrolit sistemini EDM elektrotu ve pres takımları üretmede kullanmışlardır. Çökeltmeyi istenilen alanda sınırlandırmak için bir yüksek hızlı seçici jet kullanılmıştır. Bu sistemin çalışma prensibine göre; elektrolitin bir küçük nozuldan püskürtülmesiyle nozuldan anoda doğru akış oluşturulur. Elektrolitik çökeltme bu sayede katod üzerinde küçük bir alanla sınırlanır. Nozul bir SLA makinesi lazerine benzer bir şekilde hareket ederek işlemi devam ettirir [6].

Uçak endüstrisinde Jetliner'in jeneratör tasarımı gibi komplike parçaların tasarımı ve imalatı oldukça zor olmaktadır. Bir jeneratör 1200 komplike 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 kompleks parçaların prototipini elde etmek mümkün olmuş ve daha sonra prototip halinde parçaların montajı sağlanıp hata olup olmadığı gözlemlenebilmiştir [6].

Allied-Signal firması, HPÜ yöntemi ile turbo fan jet bileşenlerini imal etmiş, RP sistemi ile elde edilen parça modelleri kullanılarak STL teknolojisi ile hassas döküm modelleri doğrudan imal edilebilmiştir [6].

Avrupalaya ihraç edilen turbo diesel Jeep Cherokee starteri Fransızlar tarafından yeniden tasarlanmıştır. Fransız grup, tasarlanan starterin motora uyup uymayacağından emin değildi. Bu sebeple SLA yöntemi ile prototip elde etmişler ve yapılan tasarımın doğruluğunu bu prototip sayesinde anlayabilmişlerdir [6].

Chrysler’de SLA modelleri reçine transferi ile kalıplama yöntemi (RTM – Resin Tarnsfer Method) ile kalıp eldesi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Karmaşık bölüm olarak tanımlanan modelin iç kısmı, SLA teknolojisi ile çok rahatlıkla oluşturulmaktadır. Örneğin Chrysler firması 2.4 litrelik bir motor bloğunu CAD tasarımını gerçekleştirmişti. Başlangıçta CAD resmine göre her şey doğru gözüküyordu buna rağmen ilk prototip SLA-500 cihazında yapıldığında anlaşıldı ki sadece 2. ve 3. silindirler arasında olması gereken bir çıkıntı 1. ve 2. silindirlerin arasına da konulmuştu. Çok sayıda mühendis ve tasarımcının gözünden kaçan bu hata RP teknolojisinin kullanımı sayesinde ortaya çıkarılmıştır [6].

Jamieson, Holmer ve Ashby’nin de belirttiği gibi, özellikle ortopedi alanında RP uygulamaları yaygın bir şekilde görülmektedir. Örneğin diz kapağı gibi eklem hastalıkları oldukça acı vermekte ve hastaya her zaman uygun protez seçimi yapılamamaktadır. Ancak RP sistemlerinin kullanılmasıyla, çok fazla deneme ve iterasyona gerek duyulmadan doğru eklem protezlerini elde etmek mümkün olmaktadır [8].

Prof. Satoshi Kawata, 15 Ağustos 2001 tarihinde, Osaka Üniversitesindeki ekibi ile 2 adet kızılötesi (UV – Ultra Violet) lazer ışınının kullanıldığı, STL teknolojisinin mikro seviyedeki bir uygulaması ile kırmızı kan hücresinden dahi küçük bir boğa modeli inşa etti. Modelin boyu 10, yüksekliği ise sadece 7 mikrometredir (0,01mm x 0,007mm). Kawata, bu yöntem ile insan damarları içine sığacak kadar küçük, ilaç taşımada kullanılabilecek medikal cihazların inşasının mümkün olabileceğini belirtmektedir [9].

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].

ABD Arizona'da bulunan Advanced Ceramics Research (ACR), Inc. tarafından ordu desteğiyle geliştirilen bir metotla modifiye edilmiş bir FDM cihazında inşa malzemesi olarak kalsiyum fosfatlı bir polimer kullanılarak suni kemik üretilmektedir. Kazalar veya kanser sebebiyle kaybedilen kemik parçası yerine yeni bir parça CT/MR ve 3B CAD ile tasarlanır. Oluşan boşluğa bu implant yerleştirildiğinde kalsiyum fosfat kemik hücrelerinin büyümesi için uygun bir ortam oluşturur. Bunun için inşa sırasında implant içinde kontrollü olarak mikro boşluklar bırakılır (micro porosity). Sonuçta kalsiyum fosfat kaplanmış mikro boşluklu polimer bir implant elde edilir. Uygulamadan 8 hafta sonra kemik implanta bağlanır, 18 ay sonunda ise kemik hücreleri seramik-polimer implant ile tamamiyle yer değiştirir. Şimdilik askeri uygulamalar için geliştirilen bu teknolojinin yakın bir zamanda sivil uygulamalarının da olacağı tahmin edilmektedir [13].

Strata3D firmasının teknoloji ofis şefi ve başkanı olan S.Scott Crump tarafından, doğrudan kullanılabilecek plastik ürünlerin Sıvıya Harç Yığılma HPÜ yöntemini ile inşasında kullanılabilecek inşa malzemeleri incelenmiştir [14].

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 [15].

Hopkinson ve Dickens 2001 yılında yaptıkları çalışmada üretilebilirlik, üretim zamanı, üretim maliyeti, malzeme özellikleri ve ürün kalitesi başlıkları altında HPÜ yöntemlerine uygun doğrudan üretimi gerçekleştirilebilecek parçaları araştırmışlardır [16].

Knitter ve arkadaşları 2002 yılında yaptıkları bir çalışmada seramik bazlı mikro parçaların üretimi için gerçekleştirilen HPÜ süreçlerini incelemiş ve bu süreçlere bağımlı olarak inşa edilen seramik bazlı mikro parçalar üzerinde testler gerçekleştirerek sonuçlarını tartışmışlardır [17].

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 incelemişlerdir [18].

2003 yılında Anna Bellini ve Selçuk Güçeri tarafından yapılan çalışma ile sıvayarak harç yığma HPÜ tekniği ile inşa edilmiş parçaların mekanik karakteristik özellikleri incelenmiştir [19].

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 ve üretilebilirlik değerleri incelenmiştir [20].

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 [21].

Mahesh ve arkadaşları Singapur Ulusal Üniversitesinde gerçekleştirdikleri çalışmada HPÜ sistemleri ve proseslerinin karşılaştırılması için kompleks yapılara sahip unsurlar taşıyan bir model tasarlamışlar ve bu modelin dört farklı HPÜ cihazında inşa işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sonrasında, HPÜ cihazlarından elde edilen

modeller üzerinde testler yaparak tezgah seçiminde etkili unsurları araştırmışlardır [22].

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 [23].

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 [24].

Konu ile ilgili yapılan son çalışmalardan biri 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 üretilebilirlik analizleri üzerine yapılmıştır [25].

Literatür incelendiğinde, uzun yıllar önce çalışmaları başlayan HPÜ teknolojilerinin başlangıçta bilgisayar verisine bağlı olarak bir CAD modelden doğrudan parça üretiminin amaçlandığı saptanmıştır. Ancak ilerleyen zamanlarda yapılan çalışmalar farklı özelliklere sahip HPÜ tekniklerini ortaya çıkarmıştır. Böylece 5 temel HPÜ tekniği başarılı bir şekilde imalat endüstrisine yer edinmeye başlamıştır. Ancak daha sonraları, HPÜ teknolojilerinin doğrudan üretimden daha önemli bir yerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu önem ise, ilk tasarımı gerçekleştirilen parçalara ait prototip üretimini kapsamaktadır. HPÜ teknolojileri ile üretilen prototipler sayesinde birçok gelişmiş saha testleri, laboratuvar deneme ve analizleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları yapılan çalışmalar ile HPÜ teknolojileri ile kompleks ve mikro yapıda parçaların üretimi incelenmiş ve alışılmış imalat teknolojilerinden daha verimli sonuçlar sergilediği gözlenmiştir. HPÜ teknolojileri, bu verimli imalat süreci sayesinde imalat endüstrisinin bir çok alanından tıp sektörüne, sanatsal eserlerin üretiminden matematik teorilerinin doğrulanmasına kadar çok farklı alanlarda uygulanarak oldukça geniş bir üretim yelpazesine kavuşturulmuştur. Daha sonraları HPÜ teknikleri ile üretilen prototip parçaların adetli üretimi konusunda çalışmaların gerçekleştirildiği literatürde görülmektedir.

Model dönüşüm teknolojileri olarak adlandırılan bu teknikler sayesinde HPÜ sistemlerinde üretilen modeller kullanılarak farklı malzemeler ile bu modele ait parça üretimleri gerçekleştirilebilmiştir.

HPÜ teknolojileri ile ilgili olarak yakın zamanda gerçekleştirilen literatür çalışmaları, HPÜ sistemlerine uygun olarak hangi tekniğin doğrudan üretimi, hangi tekniğin prototip üretimi verimli bir şekilde gerçekleştirebileceğinin belirlenmesi yönünde yapılmıştır. Bu çalışmalar dahilinde HPÜ üretim süreçleri incelenerek üretilebilirlik, zaman ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamı bakımından literatür çalışmalarını destekleyici yönde farklı HPÜ sistemlerinde üretilen kompleks yapıları bir model üretimi ile bahsedilen farklı HPÜ sistemlerini birbirleriyle karşılaştırmayı hedeflemektedir. Böylece üretilecek prototip modele uygun HPÜ tekniğinin başarılı bir şekilde seçilebilmesini planlanmıştır. Bununla beraber HPÜ teknikleri ile doğrudan üretimi gerçekleştirilebilecek parçaların ve doğru sistemle doğru prototiplerin üretimi konularını irdelenmiştir.

3. HIZLI PROTOTİP ÜRETİMİ TEKNOLOJİLERİ

3.1. Hızlı Prototip Üretimi

Bir HPÜ sistemi genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşur (Şekil 3.1) ;

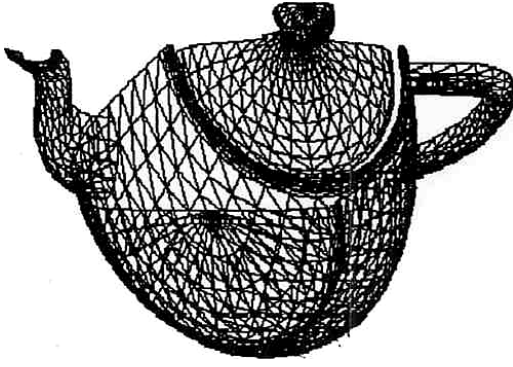
- i) Parçanın CAD modelinin oluşturulması,
- ii) Oluşturulan modelin STL formatına dönüştürülmesi,
- iii) Parçanın Z ekseninin belirlenip, destek yapıların oluşturulması,
- iv) Parça ve desteklerin belirlenen Z ekseninde dilimlenmesi,
- v) Gerekli işleme parametrelerinin seçimi,
- vi) Prototipin üretilmesi,
- vii) Prototipin alınıp son işlemlerin yapılması,
- viii) Gerekli ise çeşitli model dönüşüm teknolojileri ile daha iyi mekanik özelliklere sahip prototiplerin üretilmesi [26].



Şekil 3.1. HPÜ sisteminde genel aşamalar [6, 26]

Geometrik tanımlamaların çeşitli CAD programlarından HPÜ sistemlerine naklini sağlamada ara bir yüzeye ihtiyaç duyulmaktadır. STL formatı bütün RP sistemlerinde olmamakla birlikte çoğunda kullanılan bir standart ara yüzeydir. 3D Systems Firması tarafından tasarlanan STL formatı CAD sistemi üzerindeki bir ara yüzey yoluyla CAD veritabanından elde edilir. Bu dosya modelin dış yüzeyini temsil eden sıralanmamış bir üçgen yüzey listesinden ibarettir (Şekil 3.2). İki tür STL veri formatı vardır. Biri ASCII formatı diğeri ise ikili formattır. ASCII STL dosyası ikili formattan daha çok yer kaplamaktadır fakat okunabilir özelliktedir. Bir STL dosyası,

üçgen yüzeyleri oluşturan her üç vektör için belirtilen XYZ koordinatları ve bir normal vektörle tanımlanır (Şekil 3.3). STL dosyası bir yüzey modeli olduğundan CAD modelden elde edilir. Ancak birçok ticari CAD sistemi STL formatıyla uyumlu değildir. Bu sebeple sık sık sorunlarla karşılaşılır. Bununla birlikte STL formatıyla çalışmanın birçok belirgin avantajı vardır. Öncelikle 3 boyutlu CAD verilerinin basit bir şekilde temsil edilmesini sağlar. İkinci olarak çoğu RP ve CAD sisteminde kullanılabilirliği. Bir diğer avantajı da geometrik şekillerin veri transferi için basit dosyalar sağlamasıdır [27, 28].

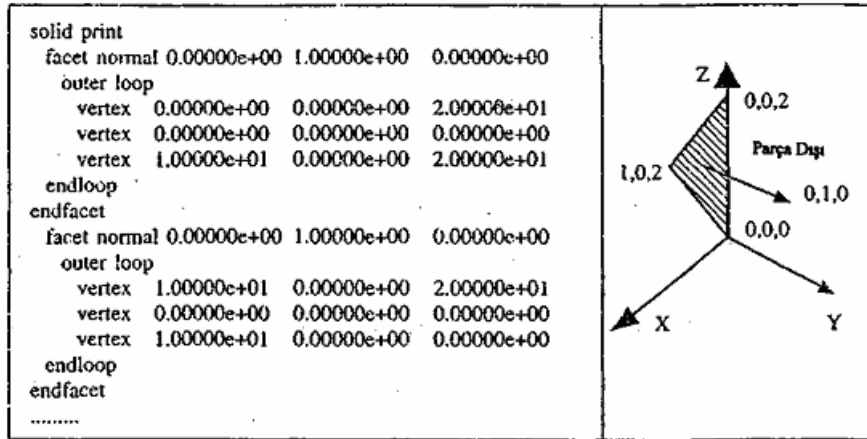


Şekil 3.2. STL Formatına çevrilmiş bir yüzey [6, 26]

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, 28].

STL Formatında karşılaşılan problemler [26];

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

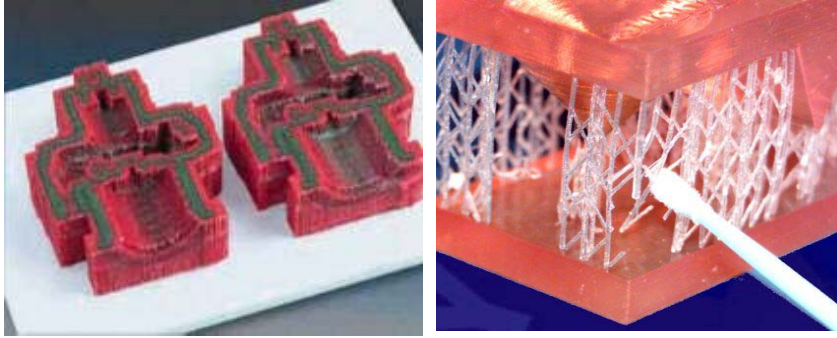


Şekil 3.3. Örnek bir STL dosyası [26, 28]

Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında seçilen modele ait CAD datasından STL formatına dönüşüm işlemi yapılmış ve daha sonra kullanılan “MATERIALISE MAGICS RP” ticari paket programı ile yukarıda bahsedilen problemler giderilmiştir. Böylece seçilen modele ait STL datasıyla parçanın HPÜ cihazlarında inşa işlemleri sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

HPÜ sistemlerinde inşa safhasında model içinde asıl unsur olmayan boşluk alanlar destek yapıları ile inşa edilir. Bunun amacı modelin oluşturulması esnasında parça üzerindeki temel unsurların inşa esnasında desteklenerek çevresinde bulunan boşluğa çökmesini engellemektir. Parçanın inşası sonrası bahsedilen bu destek yapıları parça yüzeyinden destek yapısının niteliğine bağlı olarak ayrıştırılarak temizlenir.

HPÜ teknolojilerinde temelde iki türlü destek yapısı kullanılmaktadır: Resim 3.1’de solda, *çevreleyici destek* kullanımı görülmektedir. Bu yöntemde üretilen parça dışındaki tüm boşluğa farklı kimyasal özelliğe sahip bir destek malzemesi doldurulur. Daha sonra bu destek malzemesi, sıcaklık veya çeşitli kimyasal sıvılara maruz bırakılarak ayrıştırılır. Sağda ise, sadece gerekli kısımlara uygulanan *sütunlu destek* yapısı görülmektedir. Bu teknikte genellikle ana inşa malzemesi kullanıldığı gibi farklı bir destek malzemesi de kullanılabilir. İnşa sonrası destek malzemesi manuel olarak kırılıp sökülebileceği gibi, kimyasal yolla veya ısıyla eritilerek de asıl parçadan ayrılabilir [6, 26].



Resim 3.1. HPÜ sistemlerinde kullanılan destek yapıları [6, 26]

Ticari olarak üretilmiş bütün HPÜ cihazlarının çalışma prensibindeki ortak yan, parçanın katmanlar halinde inşa edilmesidir. Fakat katmanların oluşturulma tekniği ve inşa hammaddesi olarak kullanılan malzemenin özelliği çok farklı olabilmektedir. Buna bağlı olarak HPÜ cihazları, kullandığı teknolojiye göre, Işıklı Kür, Toz Bağlama, Harç Yığılma ve Tabaka Yığılma olarak dört ana kategori altında toplanabilir. Şekil 3.4’de görüleceği üzere her ana kategori ise kendi içinde iki alt sınıfa ayrılmıştır [6, 26].



Şekil 3.4. HPÜ teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması [6, 26]

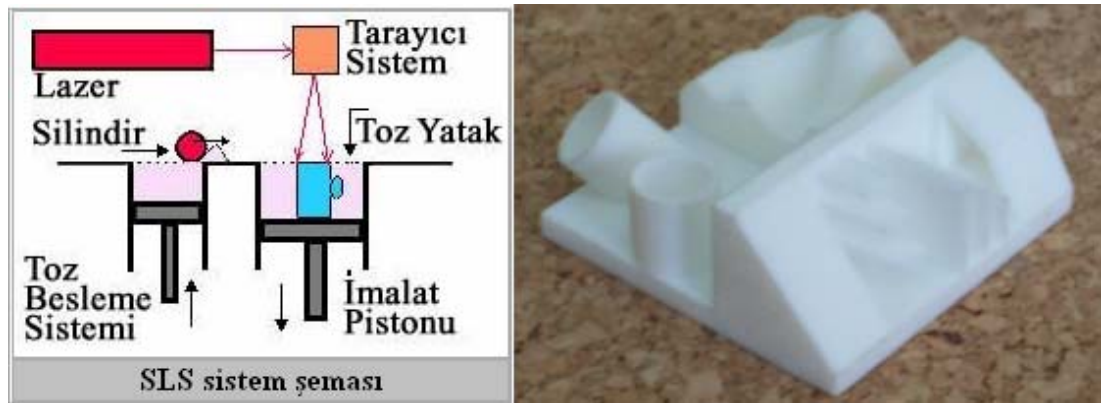
3.2. Çalışma Kapsamında Kullanılan HPÜ Teknolojileri

3.2.1. Isıtarak toz bağlama HPÜ tekniği (SLS, Selective Laser Sintering)

SLS (Selective Laser Sintering / Seçmeli Lazer Sinterlemesi) teknolojisi ilk olarak Texas Üniversitesinden Carl Deckard tarafından bir doktora çalışması olarak

geliştirilmiştir. 1 Aralık 1987'de, önceleri Nova Automation ismiyle kurulan DTM – Direct Tolling Manufacture Corp. tarafından 1992 yılında ticari hale getirilmiştir. Eylül 2001 tarihinde DTM firmasını satın almasıyla , SLS sistemleri, 3D Systems firmasının ürün yelpazesine dahil olmuştur [6].

Bu teknikte, ısıtıldığında kaynaşabilen toz halindeki bir inşa hammaddesi (heat fusible powder) ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılır. Ardından yüzeydeki seçilen bölgeler lazer ışınıyla taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda oluşan sıcaklıkla toz malzeme kısmen eriyerek ve/veya sinterlenerek temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır. Bu işlemden sonra inşa zarfının tabanında bulunan platform, bir katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Her katmanın inşası için bu işlemler gerektiği kadar tekrarlandıktan sonra, inşa süresince doğal bir destek görevi üstlenmiş olan serbest tozlar fırça veya vakum emici ile manuel olarak temizlenerek üretilen parça veya parçalar tezgah tablasından alınır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. SLS HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model

Işının tozları daha az enerjiyle ve daha hızlı kaynaştırabilmesi için inşa yüzeyi harici ısıtıcılarla sıcak tutulur. Ayrıca, metal tozları kullanıldığında kaynaşmayı engelleyici oksitlenme problemini ortadan kaldırmak için ortama oksijeni giderici farklı bir gaz doldurulur.

SLS HPÜ Tekniğinin Avantajları;

i) SLS yönteminin iş/zaman oranı oldukça yüksektir. Toz malzeme oldukça kolay ve hassas bir şekilde işlenebildiğinden yöntem verimlidir.

ii) SLS yöntemi malzeme olarak; mum, naylon, polikarbonatlar, plastik, metal veya seramik tozları kullanılabileceği gibi bunların karışımlarından oluşan kompozit tozlarında dahil olduğu geniş bir yelpaze sunar.

iii) SLS yöntemi ile imal edilmiş model için gerekli bitirme işlemleri minimum seviyededir.

İnşa 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. SLS sisteminde kullanılan başlıca inşa malzemeleri ve bu malzemelerin karakteristik özellikleri ile birlikte kullanım alanları aşağıda başlıklar halinde incelenmiştir [29-32].

SLS DuraForm Polyamide (PA) ve Glass-filled (GF) Nylon

Malzeme Sınıfı : Termoplastik toz

Faydaları : Ek işlem gerektirmeksizin dayanıklı parçalar elde edilebilir. Isıl ve kimyasal dirençleri iyidir. İşlenebilir, kaynaklanabilir, kolaylıkla mekanik birleştirme yapılabilir ve yapıştırılabilir. Mükemmel yüzey kalitesi verir. Yüksek kalitede kompleks unsurlar ve detaylar elde edilebilir. Yüksek mukavemet ve kararlılık sunar.

Kullanım Alanları : Silikon kalıplama ve kum döküme uygun sağlam modeller elde edilebilir. Doğrudan kullanım amaçlı modeller üretilebilir. Medikal ve kompleks detaylara sahip parçaların elde edilebilmesi için oldukça uygundur.

SLS HPÜ sistemlerinde kullanılan DuraForm PA ve GF malzemelerinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1. DuraForm PA ve DuraForm GF malzemelerinin tipik karakteristik özellikleri [29]

Toz Özellikleri	Birim	Test Metodu	Duraform PA	Duraform GF
Yoğunluk	g/cm ³	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
Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	Duraform PA	Duraform GF
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
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Duraform PA	Duraform GF
Gerilme Dayanımı	MPa	ASTM D638	44	38,1
Gerilme Modülü	MPa	ASTM D638	1600	5910
Kırılma Uzaması	%	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
Yüzey Kalitesi	Birim	Test Metodu	Duraform PA	Duraform GF
Üst Yüzey – İnşa Sonrası, Ra	µm		8,5	6,2
Üst Yüzey–Yüzey İşlemleri Sonrası, Ra	µm		0,13	1,0
Elektriksel Özellikler	Birim	Test Metodu	Duraform PA	Duraform GF
Hacimsel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V	ohm x cm	ASTM D257-93	3,1 x 10 ¹⁴	2,0E x 10 ¹⁴
Yüzeysel Direnç - 22 °C, %50 RH, 500V	ohm x cm	ASTM D257-93	3,0 x 10 ¹⁴	2,3E x 10 ¹⁴
Dielektrik Sabiti - 22 °C, %50 RV, 5V 1000Hz		D150-95	2,9	3,7
Dielektrik Dayanım - 22 °C, %50 RV, hava ortamında, 5V V/sn	V/mm	D149-95a	1,6 x 10 ⁴	1,5E x 10 ⁴
Kimyasal Direnç			Duraform PA	Duraform GF
Alkalinelere, Hidrokarbonlara, Yakıcılara ve solventlere karşı kimyasal direnç gösterirler.				

Somos 201

Malzeme Sınıfı : Termoplastik elastomer toz

Faydaları : Kauçuk benzeri esneklik ve fonksiyonelliğe sahip sağlam ve kararlı parçalar elde edilebilir. Basınç altında sızdırmazlığı mükemmeldir. Yüksek uzama ve mükemmel aşınma dayanımı sağlanırken renk seçenekleri düzenlenebilir.

Kullanım Alanları : Esnek, kauçuk benzeri prototipler ve parçalar ek işlem gerektirmeden elde edilebilir. Hortum, conta ve diğer sızdırmazlık özelliği istenilen parçaların doğrudan üretimi için oldukça uygundur. Hızlı ön üretim testleri ve optimizasyon yapılabilir. Gösterişli modeller elde edilebilir. Düşük hacimli üretim için uygundur.

SLS HPÜ sistemlerinde kullanılan Somos 201 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Somos 201 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 31, 32]

Toz Özellikleri	Birim	Test Metodu	Somos 201	Filtre Edilmiş
Yoğunluk	g/cm ³	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	1,07
Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 201	Filtre Edilmiş
Erime Noktası	°C	DSC	1,56	
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 201	Filtre Edilmiş
Gerilme Modülü	MPa	ASTM D638	15,5	15,5
Kırılma Uzaması	%	ASTM D638	110	130
% 5 Gerilmede Kırılma Uzaması Dayanımı	MPa	ASTM D638	1,8	2,2
% 10 Gerilmede Kırılma Uzaması Dayanımı	MPa	ASTM D638	2,0	2,6

Çizelge 3.2. (Devam) Somos 201 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri
[29, 31, 32]

Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 201	Filtre Edilmiş
Bükülme Modülü, -40 °C	MPa	ASTM D790	23	37,3
Bükülme Modülü, 23 °C	MPa	ASTM D790	13,4	14,1
Bükülme Modülü, 100 °C	MPa	ASTM D790	3	7
Birincil Yırtılma Dayanımı, 23 °C	kN/m	ASTM D624	6	23,1
Birincil Yırtılma Dayanımı, 100 °C	kN/m	ASTM D624	5,2	6
Aşınma Dayanımı, sivri CS-17 çark, 1kg yük	mg/1000/çevrim	ASTM D4060	520	0,3
Aşınma Dayanımı, sivri H-18 çark, 1kg yük	mg/1000/çevrim	ASTM D4060	870	0,5
Basma Dayanımı, 23 °C, 25mm ID x 2mm kalınlık x 300 mm uzun boru	kPa	ASTM D380	0	>160
Sertlik, 23 °C	shore	ASTM D2240	74	75
Elektriksel Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 201	Filtre Edilmiş
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	
Dielektrik Dayanım - 22 °C, %50 RV, yağ altında, 500V V/sn	V/mm	D149-95a	4,1E +13	

Laser Form, ST 100

Malzeme Sınıfı : Paslanmaz çelik toz

Faydaları : Yüksek mukavemetli parçalar normalde harcanan işçilikten daha verimli olarak üretilir. P20 çeliğine benzer özellikler, yüksek termal davranış ve ısı direnç elde edilebilir.

Kullanım Alanları : CAD datasından doğrudan metal parçalar ve takımların üretimi için oldukça verimlidir. Mukavim metal kalıp insertleri elde edilebilir. Metal

parçaların ve prototiplerin kısa süreçte ve ek işlem gerektirmeksizin elde edilmesini sağlar. Kompleks geometriler ve unsurlar kolaylıkla elde edilebilir.

SLS HPÜ sistemlerinde kullanılan ST 100 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.3’de görülmektedir.

Çizelge 3.3. ST 100 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29]

Toz Özellikleri	Birim	Test Metodu	ST 100
Yoğunluk, 23 °C	g/cm ³	ASTM D792	7,7
Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	ST 100
Termal İletkenlik, 100 °C	W/m/°K	ASTM E457	49
Termal İletkenlik, 100 °C	W/m/°K	ASTM E457	56
Termal Genleşme Katsayısı x10 ⁻⁶ , 51-150 °C	m/m/°C	ASTM E831	12,4
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	ST 100
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

Cast Form, Polistiren (Polystyrene – PS)

Malzeme Sınıfı : Termoplastik toz, Polistiren

Faydaları : CAD datasından model elde edilene kadar geçen süreçte ek işleme veya makineye ihtiyaç duyulmaz. Model hızlı ve kolay temizlenir. Düşük yoğunluk değerine sahiptir. Standart döküm uygulamaları ile uyumludur. Atık toz içeriği minimum seviyededir.

Kullanım Alanları : Kompleks unsurlara sahip modellerin hassas döküm uygulamaları için verimli sonuçlar sergiler. Alüminyum, Magnezyum, Zirkonyum ve

benzeri düşük ergime sıcaklığına sahip metaller ve reaktif malzemeler ile döküm elde edilebilir.

SLS HPÜ sistemlerinde kullanılan Polistiren inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.4’de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Polistiren inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 31]

Toz Özellikleri	Birim	Test Metodu	Filtre Edilmiş PS
Yoğunluk	g/cm ³	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
Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	Filtre Edilmiş PS
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
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Filtre Edilmiş PS
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
Yüzey Kalitesi	Birim	Test Metodu	Filtre Edilmiş PS
Üst Yüzey – İnşa Sonrası, Ra	µm		13
Üst Yüzey–Yüzey İşlemleri Sonrası, Ra	µm		3

PA 2200

Malzeme Sınıfı : Polyamide toz

Faydaları : Yüksek hassasiyet ve ölçü tamlığına sahip kompleks yapıli prototiplerin üretimi için oldukça verimlidir. Termal stres dayanımı ve yüksek mekanik dayanım kolaylıkla elde edilebilir.

Kullanım Alanları : Malzemenin tipik uygulama alanı yüksek hassasiyet ve ölçü tamlığı gerektiren fonksiyonel kompleks yapıli prototiplerin üretimidir.

SLS HPÜ sistemlerinde kullanılan PA 2200 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.5’de görölmektedir.

Çizelge 3.5. PA 2200 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 30]

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

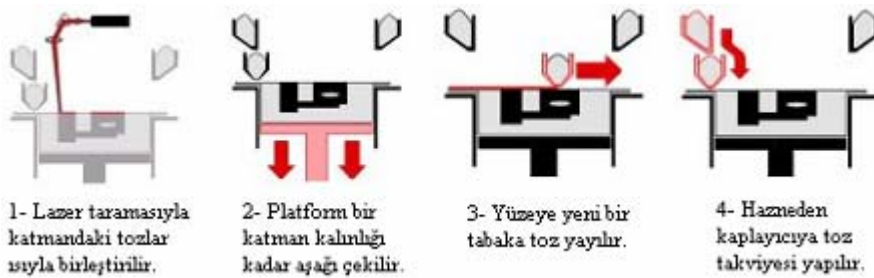
Bu çalışmada ısıtarak toz bağlama tekniği prensiplerine uygun çalışan EOS Gbmh. Firmasının üretimi olan, Çizelge 3.6’da teknik özellikleri belirtilen EOSINT P380 model HPÜ cihazı ve inşa malzemesi olarak PA2200 serisi inşa hammaddesi kullanılmıştır (Resim 3.2, Şekil 3.6, Bkz. Çizelge 3.5).

Çizelge 3.6. EOSINT P380 model HPÜ cihazı teknik özellikleri [30]

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)

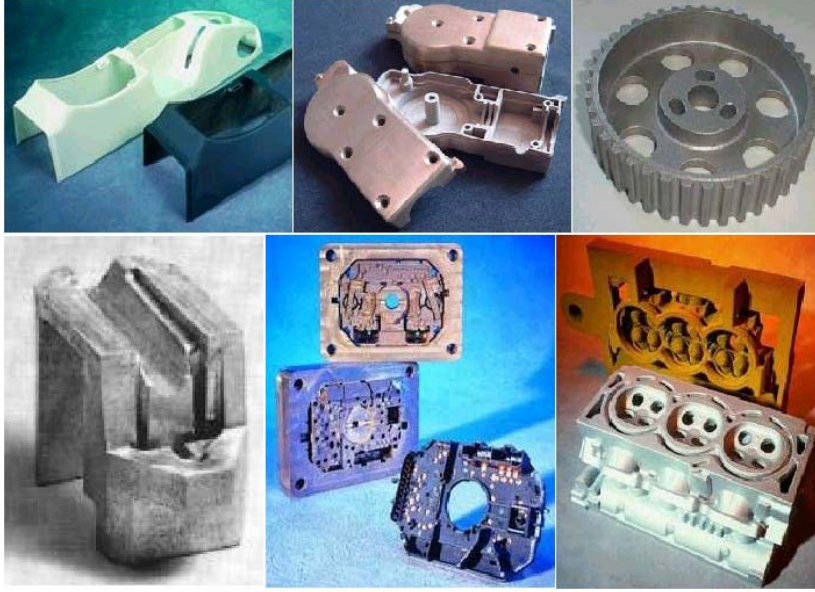


Resim 3.2. EOSINT P380 HPÜ cihazı [30]



Şekil 3.6. EOSINT Cihazıyla inşa tekniğinin aşamaları [6, 26]

Resim 3.3’de EOSINT HPÜ cihazı ile inşa edilmiş farklı tozlar kullanılarak farklı özellik ve yapılar sahip modeller ve parça örnekleri görülmektedir. Bu örnekler incelendiğinde HPÜ cihazının ve tekniğinin getirdiği kompleks yapıli modellerin istenilen özellik ve yapılarda üretilebilirliğı açık bir şekilde görülmektedir.



Resim 3.3. EOSINT cihazıyla inşa edilen örnek parçalar [6, 26]

3.2.2. Yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ tekniğı

Bu teknik, çok ağızlı bir memeden yapıştırıcı püskürtülerek tozların birbirine bağlanması prensibine göre çalışır. Bir merdane ile yeni bir katman toz yayılır. Çok ağızlı meme inşa edilmesi gereken bölgelere yapıştırıcı püskürterek tozları birbirine bağlar. Yatay platform katman kalınlığı kadar Z ekseninde aşağı hareket eder. Bu işlem inşa bitimine kadar tekrar eder. İnşa bittikten sonra, parçayı çevreleyen ve aynı zamanda destek malzemesi görevi görmüş olan tozlar vakum temizleyici ve/veya fırçayla temizlenir (Şekil 3.7).

Nişasta tabanlı tozlar, alçı ve kompozit tabanlı tozlar, elastomerik tozlar bu yöntemin başlıca 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 üretilmesi imkânını sağlar (Resim 3.5).



Şekil 3.7. Yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model

Bu çalışmada yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği prensiplerine uygun çalışan Z-CORPARATION firmasının üretimi olan, Çizelge 3.7’de teknik özellikleri belirtilen ZPrinter 310 System model HPÜ cihazı kullanılmıştır (Resim 3.4)



Resim 3.4. Z-Corp, Z310 HPÜ cihazı [33]

Resim 3.5’de Z-Corp. Z310 HPÜ cihazı ile inşa edilmiş farklı renklere sahip tozlar kullanılarak çeşitli özellik ve yapılar sahip değişik renklere modeller ve parça

örnekleri görülmektedir. Bu örnekler incelendiğinde HPÜ cihazının ve tekniğinin getirdiği endüstriyel ürünlerin üretim kolaylığı belirgin bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 3.7. ZPrinter 310 model HPÜ cihazı teknik özellikleri [33]

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



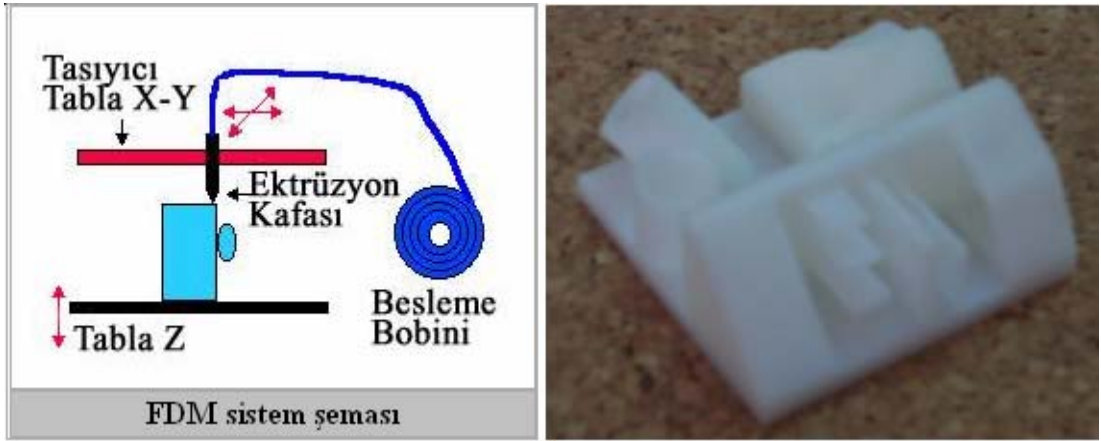
Resim 3.5. Z-Corp. Z310 HPÜ cihazı ile inşa edilen prototip örnekleri [6, 26]

3.2.3. Sıvı olarak harç yığma HPÜ tekniği (FDM , Fused Deposition Modeling)

Bu teknikte, bir besleme bobininden sürülen ve ekstrüzyon başlığında ısıtılarak sıvı veya macun kıvamına getirilen yapı malzemesinin 0,3 mm çapında bir memeden sıkma yöntemiyle (extrusion) çıkarılıp gerekli noktalara geometriksel çevrim prensibiyle sıvanması şeklinde inşa gerçekleştirilir (Şekil 3.8).

Rulolara sarılı termoplastik malzeme lifi yaklaşık 1,78 mm çapındadır. FDM işleminde termoplastik malzeme katılma noktasının biraz üzerindeki bir sıcaklıktadır. Bu sıcaklık ve ekstrüzyon memesine malzemenin pompalanması ile kontrol edilir. Her tabaka bir önceki tabaka ile eritmek suretiyle yapıştırılır. Plastik

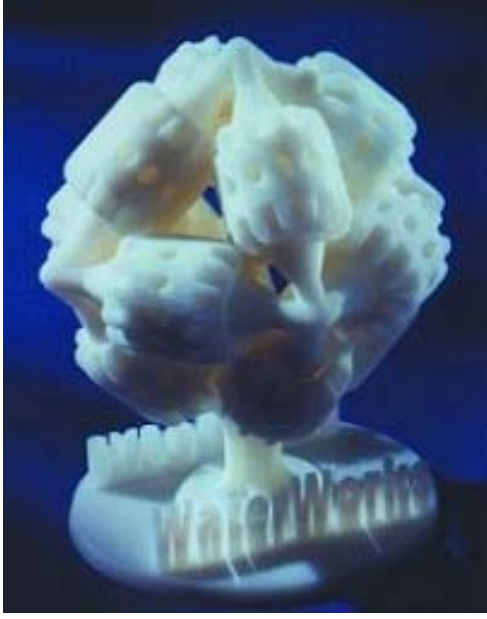
liflerin beslenme hızları monitörden izlenebilmektedir. Bu sayede, herhangi bir verilen zamandaki ekstrüzyon edilmiş malzeme miktarı kontrol edilebilir. Her tabakanın kalınlığı malzemenin fiziksel özelliklerine, hareketli kafa hızına, ekstrüzyon basıncına ve meme çıkış çaplarına göre tanımlanmaktadır. Tabaka kalınlığı tipik olarak 0,1 mm ile 0,5 mm arasında, hareketli FDM kafasına göre değişmektedir. Yol genişliği 0,25 mm ile 6 mm arasında değişmektedir. FDM inşa tekniğinde hassas döküm mumu ve polyamidin (termo plastik elastomerler) yanısıra ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) gibi erime sıcaklığı yüksek, zehirsiz mühendislik plastik lifleri rahatlıkla inşa malzemesi olarak kullanılabilir.



Şekil 3.8. Sıvı olarak harç yığılma HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model

FDM HPÜ tekniğinde yerçekimi ve diğer fiziksel etkenler ile yapı malzemesinin yanlış konumlanmaması için ikincil bir inşa gerçekleştirilir. İlk FDM modellerinde inşa ve destek amacıyla aynı malzeme kullanılıyordu. Sonraki modellere ise farklı bir destek malzemesi kullanabilmek amacıyla ikinci bir meme ilave edildi. Bu destek malzemesi, inşa sonrasında manuel olarak kolayca ayrılabilen bir kimyasal yapıya sahiptir (BASS-Break Away Support System, Kolay kırılabilir destek sistemi).

Daha sonra geliştirilen "Water Works" isimli bir destek malzemesi ise inşa sonrasında su ile çözülerek manuel olarak ulaşılması imkansız dar aralıklardan kolayca çıkarılabilir. Bu sayede, çok parçalı ve hareketli mekanizmalar da dahil birçok karmaşık parçanın imalatı mümkün olabilmektedir (Resim 3.6)



Resim 3.6. FDM Tekniği ile Water Works destek malzemesi kullanılarak inşa edilen mekanizma [6, 26]

FDM sisteminde geleneksel olarak ABS inşa malzemeleri kullanılmaktadır. Bir ABS türü olan ABS P400 FDM inşa malzemesinin karakteristik özellikleri ile birlikte kullanım alanları aşağıda incelenmiştir.

ABS P400

Malzeme Sınıfı : ABS Plastik

Faydaları : Esnemeye, bükülmeye, kırılmaya ve uzamaya karşı yüksek dayanım, suya ve neme karşı yüksek direnç, uygun maliyet en belirgin özellikleridir. Geleneksel imalat yöntemleri ile işlenebilir, boyanabilir, kaplanabilir niteliğe sahiptir.

Kullanım Alanları : Üretim çeşitliliğinin geliştirilmesinde ve fonksiyonel gerçek ömür testlerinde verimli olarak kullanılabilir. Kolay, sağlam ve kullanışlı montajlanabilen parçalar elde edilebilir. Takılıp sökülebilmeye yeteneğine sahip yedek parça amaçlı modeller elde edilebilir. FDM HPÜ sistemlerinde kullanılan ABS P400 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.8’de görölmektedir.

Çizelge 3.8. ABS P400 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 34]

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

Bu çalışmada sıvayarak harç yığma tekniği prensiplerine uygun çalışan STRATASYS Firmasının üretimi olan, Çizelge 3.9’da teknik özellikleri belirtilen Dimension 3D Printer model HPÜ cihazı ve inşa malzemesi olarak ABS P400 türü inşa hammaddesi kullanılmıştır (Resim 3.7)



StratasyS, Dimension

Resim 3.7. StratasyS, Dimension HPÜ cihazı [34]

Çizelge 3.9. Dimension 3D Printer model HPÜ cihazı teknik özellikleri [34]

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)

Resim 3.8’de FDM HPÜ tekniği ile inşa edilmiş çeşitli özellik ve yapılar sahip fonksiyonel modeller ve parça örnekleri görülmektedir. Bu örnekler incelendiğinde HPÜ cihazının ve tekniğinin getirdiği endüstriyel ürünlerin üretim kolaylığı belirgin bir şekilde görülmektedir.

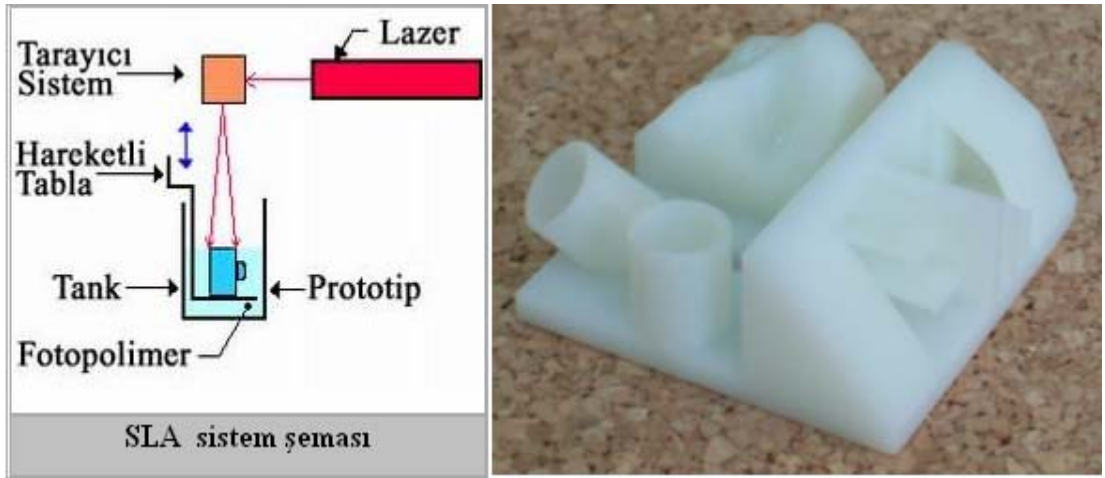


Resim 3.8. FDM HPÜ tekniği ile inşa edilen örnek parçalar [6, 26]

3.2.4. Tarayarak ışıkla kür HPÜ tekniği (SLA, Stereolithografi)

İlk ticari olmuş ve dolayısı ile ticari başarıyı en erken yakalamış olan teknolojidir. Bu teknolojiyi kullanan ilk sistem 1986 yılında kurulan 3D Systems firması tarafından

1988 yılında piyasaya çıkarılmıştır. Stereolithography, fotopolimer esaslı sıvı malzeme dolu bir tanktaki polimerlerin lazer kullanılarak katı hale getirilmesi yani kür edilmesi esasına dayanır. Kullanılan sıvı polimer, morötesi ışığa (UV) maruz kaldığında katılaştıran veya kuruyan bir fotopolimer malzemedir. Nokta şeklindeki lazer ışını bilgisayar kontrolü ile yansıtılarak tank içerisindeki sıvı malzemenin üst yüzeyinde seçilen bölgeleri kür ederek katılaştırır. Bir katman inşası tamamlandıktan sonra parçanın bulunduğu platform (elevator), katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bir kanat yardımıyla yeni bir kat sıvı fotopolimer kaplanır. Malzemenin yapışkan özelliği sayesinde tabakalar birbirlerine yapışırlar. Bu işlem tüm model tamamlanıncaya kadar devam eder. Altları boş olan kısımlar sistem yazılımı ile tespit edilerek bu kısımlar destek yapıları inşa edilir. İşlem sonrası bu destek yapıları asıl parçadan ayrılırlar (Şekil 3.9). Çoğunlukla ulaşılan ilk kür derecesi yeterli olmadığından parça bir süre daha özel bir fırında UV lamba altında bekletilir. Küçük farklar olsa da birçok firma aynı prensibi kullanmaktadır.



Şekil 3.9. Tarayarak Işıklı Kür HPÜ yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile inşa edilen model

1996'da üretilen SLA 350 den bu yana tüm modellerde "Zephyr" ticari ismiyle anılan sıvı yayma tekniği uygulanmaya başlanmıştır. Önceki modellerde ise daha yavaş çalışan sabit bir kanat (doctor blade) kullanılmıştır. Zephyr teknikliğinde yüzeye fotopolimer yayan kanat içinde bir miktar fotopolimer sıvı vakum ile yüzeyden yüksek seviyede tutulur. Bu, önceki modellerde kullanılan normal

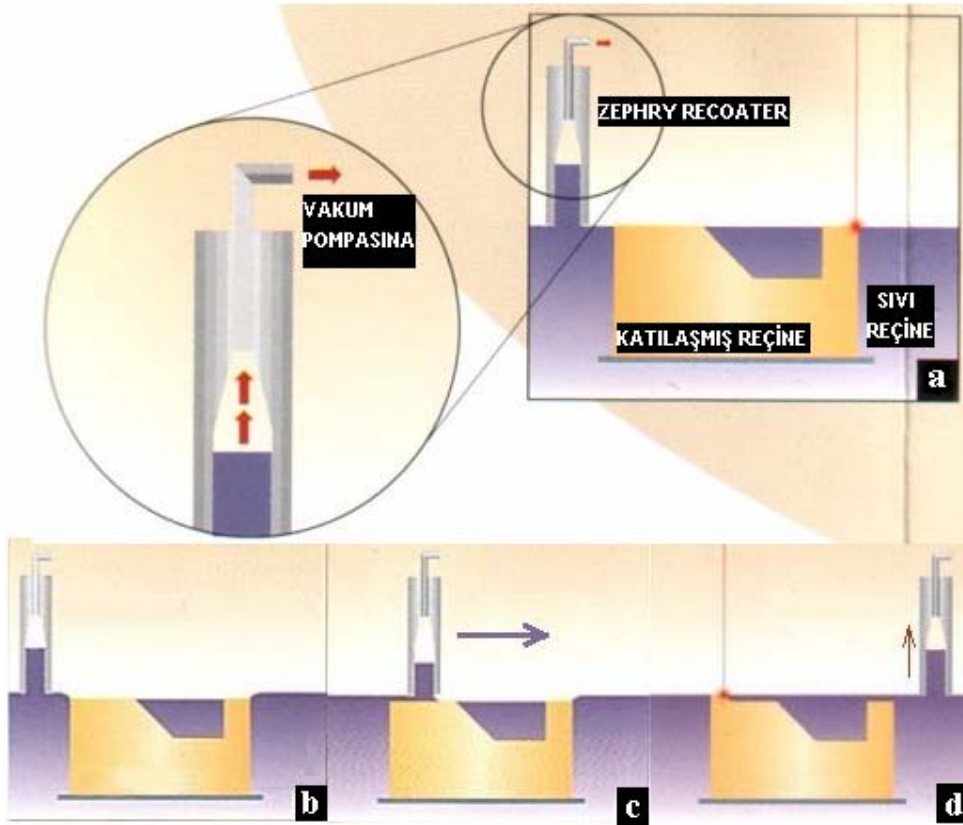
kanatçığa nazaran daha hızlı ve ince bir sıvı yayılabilmesini sağlar. Bu sayede kapalı boşluklara sahip kesitlerde aşırı sıvı birikme problemi de ortadan kalkmıştır (Şekil 3.10).

Lazer bir katmanın katılaştırmasını bitirdiğinde, Zephyr Recoater sıvı yayma için hazırdır. Sarı renkte gösterilen katılaşmış reçine (inşa halindeki parça), mavi renkteki ise sıvı haldeki reçinedir (Şekil 3.10.a).

Yeniden sıvı kaplama öncesi parça bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir (Şekil 3.10.b).

Zephyr Recoater hareket ederek parça yüzeyine ince ve düzgün bir şekilde sıvı reçineyi yayar. (Şekil 3.10.c).

Lazer bir sonraki katmanı katılaştırmaya başlar ve bu arada vakum ile hazneye yeniden sıvı reçine çekilir (Şekil 3.10.d).



Şekil 3.10. Zephyr sıvı yayma tekniği [6, 26]

Stereolithography parça detayları ve yüzey düzgünlüğü açısından oldukça başarılıdır. Reçine bazlı malzemeler, polypropilen ve diğer bazı termoplastik malzemeler kullanılabilir. İmal sonrası parçalar temizlik ve fırınlanma işlemleri gerektirir.

SLA ve diğer bazı HPÜ sistemlerinde sıvı polimer reçineler kullanılmaktadır. Sıvı fotopolimerler, belirli bir genişlikteki dalga boylarına sahip mor ötesi ışınlar kullanılarak elektromanyetik radyasyonla katılaştırılmaktadır. Katılma olayının esası, küçük moleküllerin (monomerlerin) zincir formunda birleşip daha büyük olan molekülleri (polimerleri), mor ötesi ışın altında katılaştırarak oluşturmaktır. Bu egzotermik reaksiyona *fotopolimerizasyon* denmektedir. Ayrıca ışığın gücü ve süresine bağlı olarak maruz kaldığı enerji miktarı kür seviyesini değiştirir. Bu teknolojiyi kullanan HPÜ cihazlarında genellikle görünmeyen dalga boylarında kıvıltısı (UV) ışık kaynakları kullanılmasına rağmen, görünür dalga boyundaki ışık ile aktive olabilen fotopolimer inşa malzemelerini kullanan modeller de üretilmiştir.

Resim 3.9'da doğal fotopolimer malzeme ("bitumen of Judea", Suriye'de çıkan bir tür ince asfalt veya katran) kullanılarak yapılmış bir fotoğraf plakası üzerine saatlerce düşen bir görüntüyle elde edilmiş dünyanın ilk fotoğrafı görülmektedir.



Resim 3.9. Bitumen of Judea (Nicephore, Fransa, 1826) [6, 26]

Şekil 3.11'de polimerlerin kimyasal formülü ve çapraz bağlanmış polimerler, Şekil 3.12'de çapraz bağlanmış fotopolimerlerin kimyasal yapıları, Şekil 3.13'de ise ışıkla çapraz bağlanma olayının kimyasal formülize edilmiş durumu görülmektedir.

Vinileter esaslı fotopolimerler: Vinileter esaslı fotopolimer sistemlerinde 325 nm dalga boylarında Helyum – Cadminyum lazerleriyle kullanılmaktadır. Bu türlerin düşük viskoziteli olanları, diğerlerine göre parça üzerinden daha kolay temizlenmektedir. Düşük foto hızlara sahip olmaları dezavantaj iken avantaj olarak, bu tür reçineden oluşturulmuş parçada büzülme olayı düşük olmaktadır.

Epoksi esaslı fotopolimerler : Epoksi esaslı fotopolimerler 325 nm dalga boylarında Helyum – Cadminyum lazerle katılaştırılmaktadır. 1994 yılında SLA-500 sistemi için yine epoksi esaslı SL 5180 fotopolimeri geliştirilmiştir. Bu malzeme özellikle 351 mm dalga boylarında, Argon iyon lazer tabanlı sistemlerde kullanılmaktadır. SL 5170 ve 5180 reçinelerden imal edilen SL parçalarda efektif lineer çekme düşürülmüş, büzülme değeri azaltılmış ve diğer bazı mekanik iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle daha doğru SL parçalar elde edilebilmektedir. SL prototipinde, epoksi esaslı fotopolimer malzeme kullanımı ile bazı olumlu iyileştirmeler yapılmış olmasına rağmen yine de fonksiyonel testlere uygun prototiplerde olması gereken özellikler sağlanamamaktadır. Endüstriyel uygulamalarda daha uygun prototipler elde etmek amacıyla ikincil işlemler (hassas döküm, kum kalıba döküm ve silikon kalıplama gibi) kullanılmaktadır. Bu şekilde çok daha uygun ve imal edilecek gerçek parçanın malzemesine en yakın malzemeden prototipler elde edilmiş olmaktadır. SLA reçinelerde görülen %5 - %6 hacimsel çekme epoksi esaslı olanlarda da engellenememiştir. Bu değer diğer türlere daha düşük olmaktadır. Efektif lineer çekme %1 seviyelerinden daha düşük değerlere çekilmiştir. Katı sıvı geçişi nedeniyle meydana gelen çekmenin yanında büzülme olayı da fotopolimer reçinelerde ortak bir problem olmaktadır. Büzülme faktörü değeri akrilat esaslı olanlarda %10 seviyelerinde iken epoksi esaslı olanlarda bu değer % 5-6 değerinde olmaktadır.

Macun kıvamında ve toz karışıklı fotopolimer reçineler : 3D Systems firması seramik veya metal tozu karıştırılmış fotopolimer reçine kullanabilme yolunda çalışmalar yapmıştır. Seramik yüklü fotopolimerin macun gibi koyu kıvamda olması sebebiyle ince katmanları oluşturabilmek için çok farklı yayma (recoating) mekanizmaları kullanılması gerekir. Herhangi bir toz karışımı olmasa bile, macun

kıvamında bir fotopolimer malzeme ile, destek çubukları gerektirmeyen, dalgalanma ve yüzey gerilimi problemleri olmadığı için çok daha hızlı katman yayma kapasitesine sahip HPÜ cihazları gelecekte üretilebilecektir.

Endüstriyel uygulamalarda SLA sisteminde kullanılan başlıca inşa malzemeleri ve bu malzemelerin karakteristik özellikleri ile birlikte kullanım alanları aşağıda başlıklar halinde incelenmiştir [29, 32, 35].

Somos 14120 White

Malzeme Sınıfı : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

Faydaları : Beyaz ve opak renkli görünüme sahip olan malzeme geleneksel plastiklere benzer özellikler sergiler. Bu açıdan bakıldığında uygulama sahası oldukça geniş bir yelpazeye yayılır. Sağlam, dayanıklı, su ve nem direnci yüksektir. Yüzey kalitesi açısından oldukça verimli sonuçlar sergiler.

Kullanım Alanları : Otomotiv, medikal ve endüstriyel elektronik gibi bir çok sektörde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Fonksiyonel prototiplerin elde edilmesinde, su direnci gerektiren uygulamalarda, dış görünüşü önemli ve dayanıklı konsept modellerde, yüksek nem direnci gerektiren uygulamalarda verimli sonuçlar sergilemektedir.

SLA HPÜ sistemlerinde kullanılan Somos 14120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.10'da görülmektedir.

Somos 10120 WaterClear

Malzeme Sınıfı : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

Kullanım Alanları ve Faydaları : Somos 10120 yüksek hızlı sıvı fotopolimer malzemesi ile dayanıklı, rijit ve sağlam modeller SLA HPÜ cihazlarında şeffaf görüntülü olarak üretilebilir. Bu malzeme özellikle şeffaflık gerektiren uygulamalarda kullanışlıdır. Örneğin sıvı akış analizi, stres analizi ve model üzerinde

yapılması gereken optik analizler için verimli sonuçlar sergiler. Kırılma direncine sahip sağlam ve dayanıklı rijit modellerin üretimi için uygundur.

Çizelge 3.10. Somos 14120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri
[29, 32, 35]

Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 14120
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
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 14120
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
Yırtılma Dayanımı	N/m	ASTM D1004	123000
Nem Alma Oranı	%	ASTM D570-98	0,24
Elektriksel Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 14120
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

SLA HPÜ sistemlerinde kullanılan Somos 10120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.11’de görülmektedir.

Çizelge 3.11. Somos 10120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri
[29, 32, 35]

Termal Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 10120
Akma Noktası Sıcaklığı	°C	ASTM E1545-00	28
0,46 MPa Basınç Altında Erime Noktası	°C	ASTM D648-98c	44,9
1,82 MPa Basınç Altında Erime Noktası	°C	ASTM D648-98c	46,8
-40 °C - 0 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim	°C ⁻¹	ASTM E831-00	76 x 10 ⁻⁶
0 °C - 50 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim	°C ⁻¹	ASTM E831-00	119 x 10 ⁻⁶
50 °C - 100 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim	°C ⁻¹	ASTM E831-00	164 x 10 ⁻⁶
100 °C -150 °C Ortam Sıcaklık Aralığında Elastikiyet Değişim	°C ⁻¹	ASTM E831-00	159 x 10 ⁻⁶
Mekanik Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 10120
Gerilme Dayanımı	MPa	ASTM D638M	26
Kopma Uzaması	%	ASTM D638 M	32
Eğilme Uzaması	%	ASTM D638 M	4,2
Elastikiyet Modülü	MPa	ASTM D638M	1710
Bükülme Dayanımı	MPa	ASTM D790M	39,5
Bükülme Modülü	MPa	ASTM D790M	1310
IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli	J/m	ASTM D256A	0,481
Sertlik, Shore D		ASTM D2240	81
Yırtılma Dayanımı	kg	ASTM D1004	372
Nem Alma Oranı	%	ASTM D570-98	1,21
Elektriksel Özellikler	Birim	Test Metodu	Somos 10120
Dielektrik Sabiti, 60 Hz		D150-98	4,2
Dielektrik Sabiti, 1 KHz		D150-98	4,0
Dielektrik Sabiti, 1 MHz		D150-98	3,5
Dielektrik Dayanım	kV/mm	D149-97a	15,4

Somos 9120

Malzeme Sınıfı : Düşük viskoziteli sıvı epoksi fotopolimer

Kullanım Alanları ve Faydaları : Somos 9120, SLA HPÜ cihazları kullanılarak dayanıklı, fonksiyonel ve hassas ölçü tamlığına sahip prototipler üreten sıvı fotopolimerdir. Malzeme mükemmel derecede kimyasal dirence sahiptir. Geniş proses süreci, mükemmel tolerans, yüksek ısı direnç ve nem dayanımı değerlerine sahiptir. Rijitlik ve fonksiyonellik arasında mükemmel bir denge sergiler. Silikon kalıplama uygulamalarına uygun prototipler elde edilebilir. Otomobil parçalarının, elektronik parçaların, medikal ürünlerin kritik ihtiyaçlarına sağlam ve dayanıklı cevaplar verebilir.

SLA HPÜ sistemlerinde kullanılan Somos 9120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.12’de görülmektedir.

Çizelge 3.12. Somos 9120 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri
[29, 32, 35]

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
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

Kullanım Alanları ve Faydaları : ABS sınıfı plastik türlerine benzer özellikte sağlam parçalar üretilen SLA HPÜ malzemesidir. Rijitlik ve dayanıklılıkta güzel bir

kombinasyon sergiler. İyi ısı performansına ve kaliteli bir dış görünüme sahiptir. Mükemmel yan duvarlar ve hassas kompleks yapıları elde edilebilir. Fonksiyonel uygulamalarda dayanıklı parçaların üretimi için uygundur.

SLA HPÜ sistemlerinde kullanılan RenShape SL7560 inşaat malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.13’de görülmektedir.

Çizelge 3.13. RenShape SL7560 inşaat malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 35]

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
Bükülme Modülü	MPa	ASTM D790	2400 - 2600
IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli	J/m	ASTM D256	28 - 44
Sertlik, Shore D		ASTM D2240	86
Yoğunluk	g/cm ³		1,22

RenShape SL5510

Malzeme Sınıfı : Düşük viskoziteli sıvı fotopolimer

Kullanım Alanları ve Faydaları : Yüksek ölçü doğruluğuna sahip SLA HPÜ malzemesidir. Mükemmel yanduvur kalitesi, yüksek nem direnci, düşük viskozite en belirgin özellikleridir. Doğrudan endüstriyel parçaların üretimi ve hassas döküm uygulamaları için uygun şartlara sahiptir.

SLA HPÜ sistemlerinde kullanılan RenShape SL5510 inşaat malzemesinin tipik karakteristik özellikleri Çizelge 3.14’de görülmektedir.

Çizelge 3.14. RenShape SL5510 inşa malzemesinin tipik karakteristik özellikleri [29, 35]

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
Bükülme Modülü	MPa	ASTM D790	3054
IZOD Çarpma Dayanımı, Çentikli	J/m	ASTM D256	27
Sertlik, Shore D		ASTM D2240	86
Yoğunluk	g/cm ³		1,23

Bu çalışmada tarayarak ışıkla kür HPÜ teknolojisi prensiplerine uygun çalışan Zephyr sıvı yayma tekniğini kullanan 3D SYSTEM firmasının üretimi olan, Çizelge 3.15’de teknik özellikleri belirtilen SLA 7000 model HPÜ cihazı ve inşa malzemesi olarak Somos 14120 White kullanılmıştır (Resim 3.10), (Bkz. Çizelge 3.10).



Resim 3.10. 3D System, SLA 7000 HPÜ cihazı [35]

Çizelge 3.15. 3D SYSTEM SLA 7000 model HPÜ Cihazı Teknik Özellikleri [35]

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 ₄ , 800mW
Tarama Hızı	2,54 – 9,52 m/saniye (140 - 525 ips)

Resim 3.11’de SLA HPÜ tekniği ile farklı karakteristik özelliklere sahip inşa malzemeleri ile inşa edilmiş farklı kullanım özelliklere sahip modeller, parça ve kalıp örnekleri görülmektedir. Bu örnekler incelendiğinde HPÜ cihazının ve tekniğinin getirdiği endüstriyel ürünlerin veya endüstriyel ürün imalatında kullanılabilecek sistemlerin üretim kolaylığı belirgin bir şekilde görülmektedir..



Resim 3.11. SLA HPÜ tekniği ile üretilmiş örnek parçalar [6, 26]

3.3. Hızlı Prototip Üretimi Teknolojileri Uygulama Sahaları

3.3.1. Kavramsal modelleme uygulamaları

Yeni ürün geliştirme kapsamında, bir tasarım fikrini geliştirmek ve ortaya çıkabilecek tasarım hatalarını minimize edebilmek için ürüne ait modelin hızlı bir şekilde imalatı söz konusu olmaktadır. Tasarım sonrası gerçekleştirilen bu modellemeye *Kavramsal Modelleme* (conceptual modeling) veya *Konsept Modelleme* (concept modeling) denilmektedir. Kavramsal modeller, tasarımın ilk safhalarında tasarımcı, imalat sorumlusu ve pazarlama ekibi arasındaki haberleşmeyi kolaylaştırarak ürün geliştirme çalışmalarının daha hızlı, hatasız ve verimli yapılmasına yardımcı olur. Bu amaçla kullanılacak modellerin çoğunlukla yüksek mukavemette veya hassasiyette olması beklenmez. Asıl amaç en kısa zamanda ofis ortamında kolaylıkla modeli inşa edebilmektir. Bu amaca yönelimi açısından HPÜ teknolojileri diğer modelleme ve üretim tekniklerine göre daha avantajlı olmaktadır.

Resim 3.12’de SLA HPÜ tekniği ile parçaları inşa edilerek montajı tamamlanmış yeni tasarlanan bir motor görülmektedir. Parçalarının inşa işlemi gerçekleştirilen bu konsept model motor sayesinde montaj ve tasarım sırasında ortaya çıkabilecek birçok problem önceden tespit edilebilerek giderilebilmektedir.

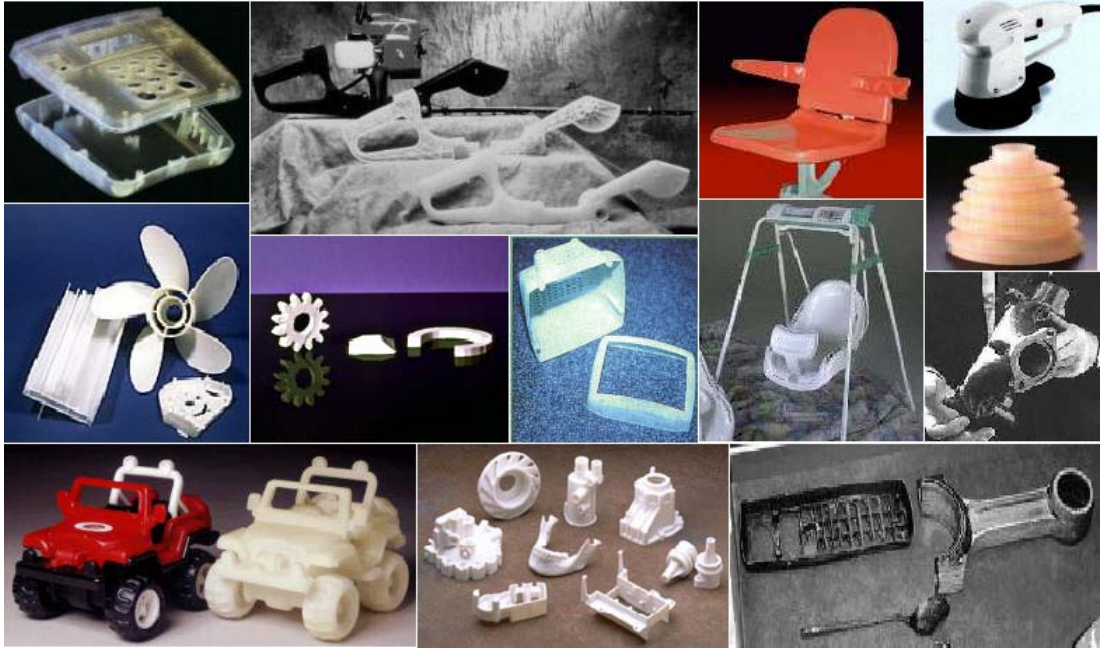


Resim 3.12. HPÜ Teknolojisiyle inşa edilmiş motor modeli [6, 26]

3.3.2. Fonksiyonel prototipleme uygulamaları

HPÜ teknikleri kullanılarak endüstrinin bir çok alanında yeni ürün geliştirme sürecinde tasarlanan ürünlere ait prototipler elde edilebilmektedir. Bu sayede, yeni ürün geliştirme sürecinde meydana gelebilecek tasarım hataları kısa zaman zarfında tespit edilerek ürün oluşumu kısa süre içerisinde tamamlanıp hitap edeceği piyasaya çıkarılabilmektedir. Bununla birlikte endüstrinin her alanında yeni geliştirilen ürünlere ait prototipler tasarım ekibi, imalat ekibi ve pazarlama ekibi arasındaki koordinasyonu ve çalışma verimliliğini artırır.

Resim 3.13’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 3.13. Farklı HPÜ teknikleri kullanılarak inşa edilmiş fonksiyonel prototipler [6, 26]

Resim 3.14’de HPÜ tekniklerinden olan SLA teknolojisi ile inşa edilmiş Porsche firmasına ait motor prototipi görülmektedir. Porsche firması yeni geliştirdiği bu motorun silindir başlıkları soğutma performansını test etmek için SLA teknolojisi ile bir prototip imal etmiştir. SLA inşa malzemesi özelliklerinden dolayı prototip şeffaf

olduğu için soğutma sıvısına katılan hava kabarcıkları vasıtasıyla sıvının akışı başarıyla gözlenebilmiştir. Böylece yeni ürün gelişimi süreci başarıyla sonuçlanarak istenilen hedeflere ulaşılması daha kısa zamanda ve daha verimli bir şekilde gerçekleşmiştir.



Resim 3.14. Porsche firması tarafından geliştirilen bir motora ait HPÜ prototipi [6, 26]

3.3.3. Doğrudan döküm kalıbı üretimi

Z-Corp firması tarafından geliştirilen bu uygulama ile alçı-seramik karışımlı bir çeşit toz inşa malzemesi kullanılarak prototip döküm kalıp ve maçaları doğrudan inşa edilebilmektedir. ZCast 500 isimli bu toz inşa malzemesi ile alüminyum, çinko ve magnezyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip paslanmaz metallerin dökümü gerçekleştirilebilmektedir. Resim 3.15’de ZCast prosesi ve ZCast 500 toz inşa malzemesi kullanılarak elde edilmiş bir döküm kalıbı, kalıp maçası ve bu kalıptan dökülmüş alüminyum bir parça görülmektedir.



Resim 3.15. Z Cast prosesi ile elde edilmiş döküm kalıbı [6, 26]

3.3.4. Hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretimi

Model dönüşüm teknolojileri arasında yer alan hassas döküm tekniğinden yararlanılarak HPÜ teknikleri ile elde edilen kompleks yapılara sahip bir çok modelin, hassas döküm tekniğine elverişli malzemeler kullanılarak metal prototiplere veya asıl parçalara dönüşümü ile üretimi gerçekleştirilebilir.

Resim 3.16’da SLA çabuk döküm (Quick Cast) yöntemi kullanılarak inşa edilmiş Mercedes’e ait bir motor gövdesi prototipi ve bu prototip kullanılarak hassas döküm tekniği ile imal edilmiş metal motor gövdesi, Ford firması için geliştirilen SLA tekniği ile inşa edilmiş prototip ve bu prototip kullanılarak hassas döküm tekniği ile A356-T6 alüminyum malzemedan dökülmüş karmaşık yapıli 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 3.16. Hassas döküm tekniği ile üretilen metal parça ve prototipler [6, 26]

3.3.5. Analiz ve test uygulamaları

HPÜ teknikleri kullanılarak inşa edilen bazı modeller üzerlerinde taşıdıkları malzeme özellikleri bakımından foto elastik gerilim analizi, dinamik test ve optik gerilim analizi uygulamaları için kullanılabilmektedirler.

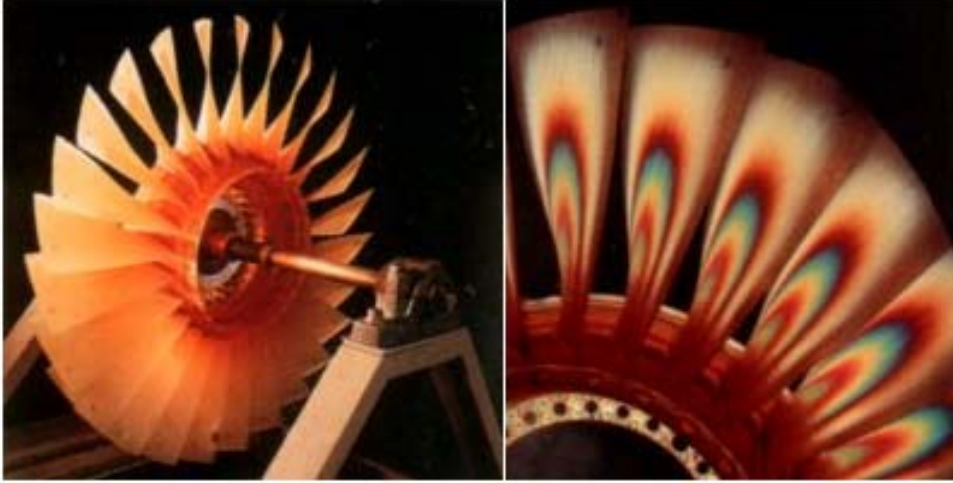
SLA ile inşa edilen modeller şeffaf oldukları için foto elastik gerilim analizi yönteminde kullanılmaya müsaittirler. Örneğin bir Alman otomobil üreticisi yeni geliştirdiği bir piston kolunu SLA teknolojisi ile inşa edip polarize ışık altında gerilim dağılımını başarıyla test etmiştir. Bu sayede talaşlı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

Amerika’da, Allied Signal Engines firmasında Üretilmesi düşünülen yeni bir jet motoruna ait metal türbin kanatlarının büyük ölçekli modelleri SLA ile üretilmiş ve titreşim test cihazına bağlanarak dinamik testleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Deneysel gerilim ve mukavemet analizinde etkili bir yöntem olarak mühendislikte uzun yıllardır kullanılmakta olan optik gerilim analizi (optical stress analysis veya photoelasticimetry) tekniklerinde kullanılacak modeller artık uygun (aktif) optik özelliklere sahip şeffaf fotopolimer reçinelerle hızlı, kolay ve ucuz bir şekilde Stereolitografi (SL) cihazlarıyla 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 (yeni adıyla Vantico) ile SL epoksi reçinelerinin optik gerilim analizi tekniklerinde uygulanması için işbirliğine başlamışlardır.

Resim 3.17’de soldaki resimde görülen 70 cm çapındaki türbin rotor ve kanat modeli 9 parça halinde 3D Systems SL cihazlarıyla 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 SL tekniği ile de imal edilebiliyordu ama SL modellerinin doğrudan testlerde kullanılabiliyor olması daha hızlı ve ucuz bir çözüm imkanı sunmuştur. Doğrudan SL ile model imalatı özellikle silikon kalıplama ile bile tek parça halinde üretilmesi çok zor, karmaşık yapıli parçaların üretilmesi ve testi için çok uygundur.

Resim 3.17’de sağıdaki 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.



Resim 3.17. Jet türbini optik gerilim analizi uygulaması [6, 26]

3.3.6. Hızlı kalıp imalatı uygulamaları

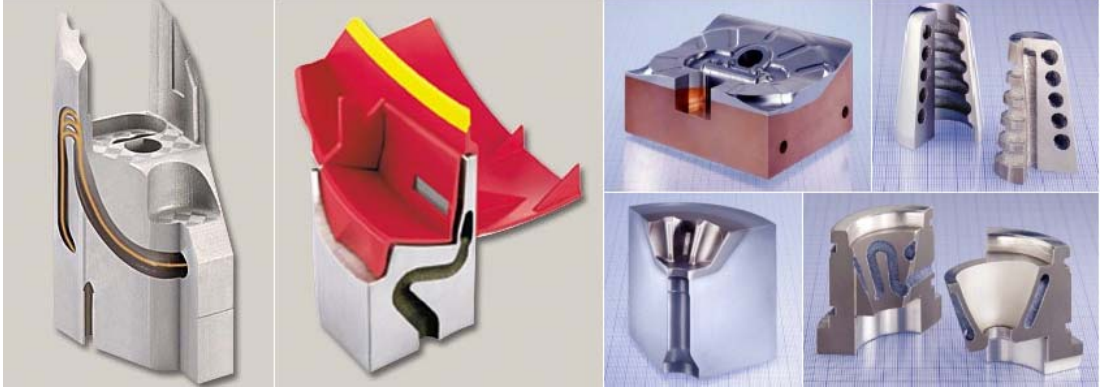
Yeni ürün geliştirme sürecinde HPÜ teknikleri ile inşa edilen prototipler sayesinde metal ve plastik enjeksiyon kalıplarının imalatı, tasarımdan meydana gelebilecek hatalar kontrol altında tutularak hızlı bir süreç ile sorunsuz olarak verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Hızlı kalıp imalatı yöntemleri *doğrudan metal kalıp imalatı*, *doğrudan kalıp imalatı (metal harici malzemeler)*, *dolaylı metal kalıp imalatı* olarak üç ana başlık altında toplanabilir.

Doğrudan metal kalıp imalatı : Bu yöntemde kalıp önce plastik kaplı özel metal tozları (LaserForm ST-100) kullanılarak inşa edilir (lazer ışını, plastik tabakayı eriterek metal tozlarını geçici olarak birbirine yapıştırır). İnşa bitiminde “Yeşil Parça” (Green Part) olarak adlandırılan parça özel bir fırında önce ısıtılarak plastik yapıştırıcıdan arındırılır (Debinding Process), ardından parça sıcaklık altında bir süre daha bekletilerek sinterlenir. Sinterleme sonrasında gözenekli çelik bir kalıp oluşmuştur ve parçanın bu durumu “Kahverengi Parça” (Brown Part) olarak adlandırılır. Mukavemeti arttırmak için kalan boşluklara yine fırın içinde erimiş bakır (yeni yöntemlerde bronz) emdirilir. Pamuğun veya süngerin suyu emdiği gibi gözenekli çelik de bakırı kolayca emer. 2-3 haftada tamamlanabilen bu işlemler sonrasında tam yoğunluğa erişmiş parça (fully dense part) plastik enjeksiyonda kalıp olarak kullanıldığında 100000 parçaya kadar basabilecek mukavemete sahiptir. Kalıp içindeki bakırın ısı iletimini arttırması sayesinde kalıbın çalışma sırasında soğuması daha kolay olur. Ayrıca kalıp içine inşa sırasında yüzeye paralel şekilde eğimli soğutma kanalları da bırakılabilir. Bu yöntem Rapid Tool olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.14)



Şekil 3.14. Rapid Tool tekniği safhaları [6, 26]

Resim 3.18’de doğrudan metal kalıp imalatı yöntemi ile kalıp yüzeyine uyumlu yapıda soğutma kanallarına sahip imal edilmiş kalıp örnekleri görülmektedir.



Resim 3.18. Doğrudan metal kalıp imalatı ile üretilen kalıp örnekleri [6]

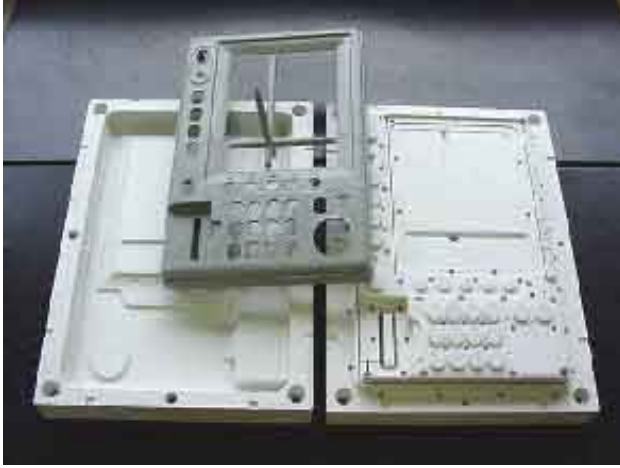
Metal harici malzemeler ile doğrudan kalıp imalatı : HPÜ teknolojileri ile üretilen, inşa malzemesi ve yöntemine bağımlı bazı modeller doğrudan kullanılabilir kabiliyetlerine sahiptirler. Bu modeller doğrudan sistemlere ait parçalar olarak kullanılabileceği gibi sisteme ait bir parçanın üretim kalıbı olarak ta kullanılabilirler. Bu bağlamda bazı HPÜ teknolojileri doğrudan üretim sistemleri olarak ta değerlendirilebilmektedir.

Resim3.19’da görülen, HPÜ cihazlarıyla SCR802 isimli takviyeli fotopolimer reçinesiyle imal edilmiş kalıplar 100-200 adet ABS parçayı plastik enjeksiyon makinesinde üretebilecek dayanıma sahiptirler. Sağda görülen maçalı kalıp SONY/Mavica dijital fotoğraf makinesi prototiplerini basmak için üretilmiştir.



Resim 3.19. Takviyeli fotopolimer reçinesiyle imal edilmiş kalıplar [6, 26]

Resim 3.20’de görülen mukavemet takviyesi için seramik tozlarının karıştırıldığı TSR 1971 isimli bir tip fotopolimer reçine ile inşa edilmiş 50-100 adet plastik basılabilecek enjeksiyon kalıbı doğrudan imal edilebilir. Görüldüğü gibi toz katkı sebebiyle fotopolimer mat beyaz renklidir.



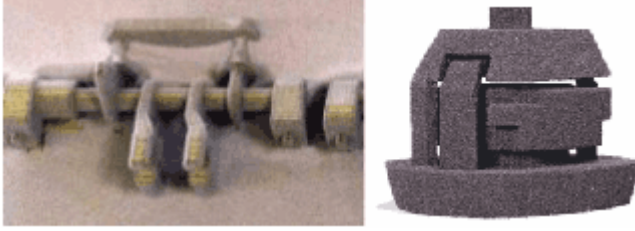
Resim 3.20. HPÜ tekniği ile inşa edilmiş enjeksiyon kalıbı [6, 26]

Resim 3.21’de SLA ile imal edilmiş mum basma kalıbı, bu kalıp kullanılarak elde edilmiş mum model (kırmızı) ve mum model kullanılarak hassas dökümle imal edilmiş metal golf sopası kafası görülmektedir.



Resim 3.21. SLA tekniği ile inşa edilmiş mum basma kalıbı [6, 26]

Resim 3.22’de EOSINT S700 HPÜ cihazında özel bir çeşit maça kumunun sinterlenmesi ile elde edilmiş kompleks kum döküm kalıp maçaları görülmektedir. Bu sayede döküm parçaların prototipleri maça kalıbı imal edilmesine gerek kalmadan çok kısa sürede elde edilebilmektedir.



Resim 3.22. HPÜ teknikleri ile inşa edilmiş kompleks yapılı kum döküm kalıbı maçası [6, 26]

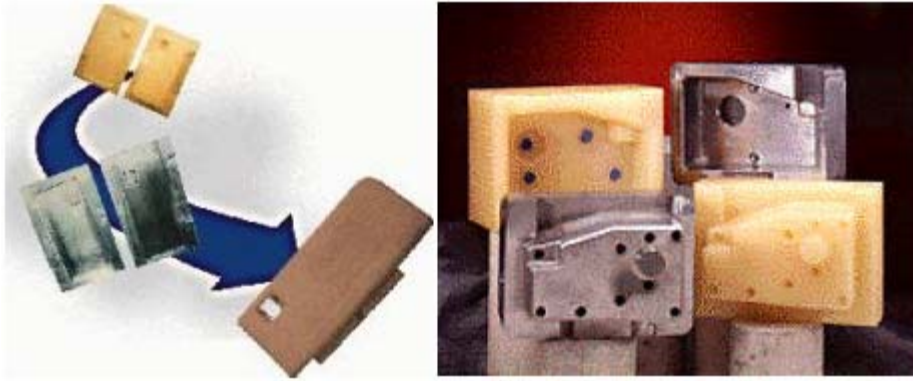
Resim 3.23’de, Formus firmasının küresel partiküllerden oluşmuş ince kumu katman katman mumun püskürtülmesiyle yapıştırarak imal ettiği bir kalıp görülmektedir. Bu kalıp Harvard Üniversitesi’nde yürütülen bir proje çerçevesinde imal edilen ve güneş enerjisiyle çalışacak aerodinamik yapı bir aracın fiberglas gövdesinin üretiminde kullanılacaktır.



Resim 3.23. Harvard üniversitesi’nde yürütülen bir proje çerçevesinde imal edilen kalıp [6, 26]

Dolaylı metal kalıp imalatı : Hızlı metal kalıp imalatı için doğrudan HPÜ teknolojilerinin kullanımı yanında, HPÜ yöntemleri ile üretilmiş düşük mukavemetli modeller yardımıyla benzer geometriye sahip fakat daha mukavemetli kalıp üretimi konusunda *model dönüşüm teknolojileri* adı verilen birçok teknoloji mevcuttur ve halen geliştirilmektedir.

Resim 3.24’de görülen SLA 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 3.24. SLA tekniği ile inşa edilmiş modeller kullanılarak hassas döküm ile imal edilmiş plastik enjeksiyon kalıpları [6, 26]

Resim 3.25’de görülen oyuncak otomobil modelinin parçaları normalden 3 kat büyük bir şekilde SLA tekniği ile üretildikten sonra kopya frezeyle (pantograf) 3 kez küçültülerek hassas bir şekilde modele ait metal kalıplar işlenmiştir.



Resim 3.25. Oyuncak otomobil modeli [6, 26]

3.3.7. Doğrudan imalat uygulamaları

Günümüzde HPÜ teknolojisi ile imalat henüz bilinen seri imalat yöntemlerinden çok yavaş ve pahalı olduğu için bu yöntemle üretilen parçalar genellikle doğrudan kullanılmazlar. Fakat bir adet veya çok az sayıda parçaya ihtiyaç duyuluyorsa ve kullanılan malzeme özellikleri ihtiyacı karşılıyorsa bir HPÜ cihazı çıktısını günlük hayatta değişik uygulamalarda doğrudan kullanabilmek mümkündür. Mesela özel amaçlı bir laboratuvar deney aletinin belli plastik parçalarının üretilmesi için HPÜ teknolojisi çok uygundur.

Boeing Firması 2002 yılında az sayıda gereken bazı parçaları SLS (3D Systems/ Vanguard) teknolojisi ile plastik tozlarından inşa ettikten sonra doğrudan uçaklarda kullanmaya başlamıştır. Boeing firması, bu hedefe yönelik olarak Haziran 2002’de ODM (On Demand Manufacturing) isimli, talep üzerine çabuk imalat yapabilecek özel bir birim de kurmuştur. Boeing bu çalışmaya öncelikle askeri uçakların havalandırma parçalarından başlamış, zamanla daha kritik parçaları da HPÜ teknolojisi ile doğrudan üretmeyi hedeflemiştir. Böylece metal kalıpla imalata kıyasla daha kısa sürede ve daha düşük maliyetle üretim gerçekleştirebilmektedir. 3D Systems bu çözümüne ADM (Advanced Digital Manufacturing - İleri Sayısal İmalat) ismini vermiştir. Resim 3.25’de ADM kapsamında SLS Vanguard ile polyamide (PA) malzemeden inşa edilmiş ve doğrudan uçakta kullanılmaya hazır bir havalandırma kanalı parçası görülmektedir. İçinde havanın akışını yönlendirmek için kanal boyunca uzanan birbirine paralel karmaşık geometrili kanallar bulunan ve çok az sayıda ihtiyaç duyulan bu parçayı plastik enjeksiyon metoduyla imal etmek çok pahalı ve zaman alıcı olacaktı.



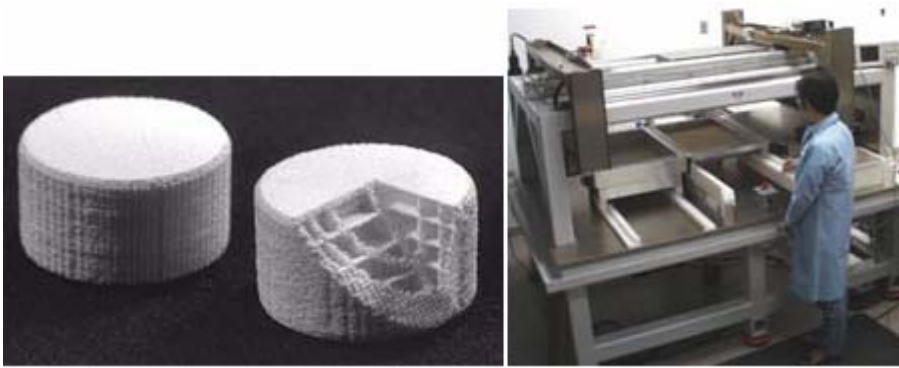
Resim 3.25. Havalandırma kanalı parçası [6, 26]

Ticari olarak, HPÜ teknolojisinin doğrudan imalatı kullanıldığı en iyi örnek ABD’deki Specific Surface isimli bir firmanın ürettiği seramik filtrelerdir. 1995 yılında faaliyete geçen bu firma MIT’ de geliştirilen 3B HPÜ teknolojisini lisanslamıştır. Bilgisayar ile tasarlanan filtreler istenilen yoğunlukta ve geometride üretilmektedir. Bu filtreler klasik yöntemle imal edilenlere kıyasla 10 kat daha fazla performans gösterebilmektedirler (Resim 3.26).



Resim 3.26. Yüksek performanslı seramik filtreler [6, 26]

HPÜ teknolojilerinden faydalanan ve çeşitli ilaç tozları ve bağlayıcılar kullanan sistemler kullanılarak ilaç kapsüllerinin doğrudan imalatı mümkün olmaktadır (Resim 3.27).



Resim 3.27. HPÜ teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen ilaç kapsülleri imalatı [6, 26]

Almanya'daki Microtec firmasının inşa ettiği, bir enjektör iğnesinin içine girebilecek kadar küçük motor ve mekanizmalar doğrudan imalat için güzel bir örnektir. Katmanlar inşa edilirken gerekli yerlere magnetik partiküller konulmakta ve böylece

elektrik motoru imal edilmektedir. Motora bağı diğer tüm mekanizmalar da entegre olarak inşa edilmiştir. Benzer şekilde inşa edilmiş 0,65 mm çapında ve 4 mm boyundaki denizaltı birçok küçük ve dar alanlarda keşif yapmakta kullanılabilir. Mikro boyutlu parçaların üretiminde HPÜ teknikleri kullanılarak doğrudan imal edilen bu modeller, HPÜ teknolojilerinin en önemli örnekleri arasında yer almaktadır (Resim 3.28).

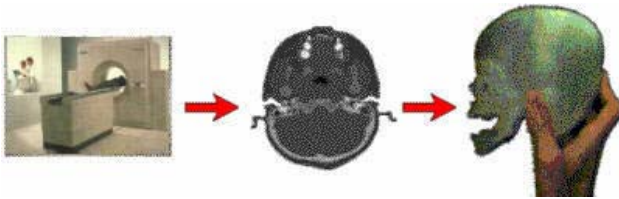


Resim 3.28. Bir enjektör iğnesinin içine girebilecek kadar küçük motor , mekanizmalar ve denizaltı [6, 26]

3.3.7. Medikal uygulamalar

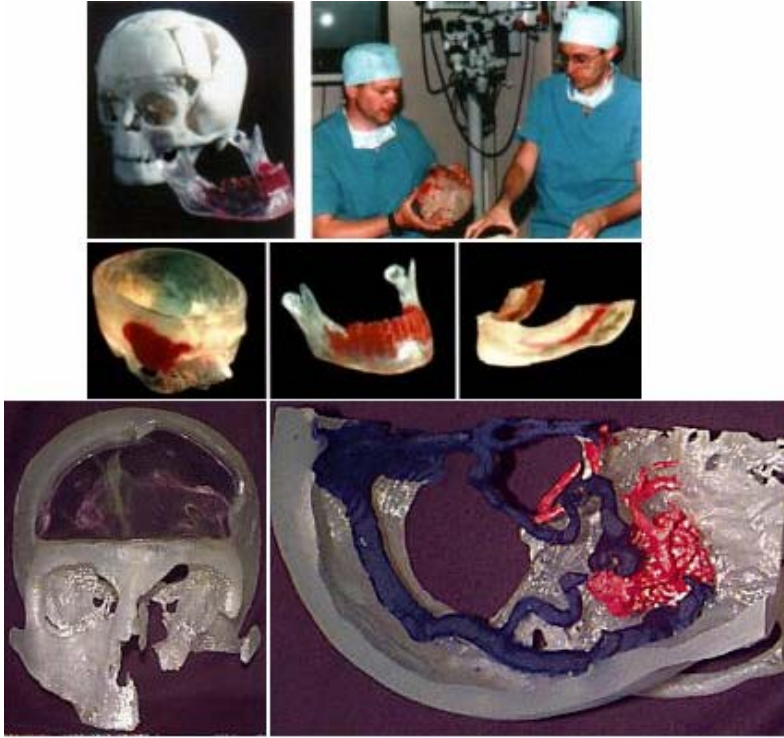
HPÜ teknolojisinin en önemli uygulama alanları arasında yer alan medikal uygulamalardan söz edebilmek için CT ve MR cihazları ile hastanın istenilen organına ait 3B geometri verisini elde edilmesi gerekir. Buda günümüzde oldukça gelişmiş olan tıp teknolojisi ile mümkün olmaktadır.

HPÜ teknolojisinin medikal uygulamalarında, gerekli medikal modelin inşası veya tasarımı için öncelikle hastanın istenilen uzvu mümkün olduğu kadar hassas bir şekilde (1mm) taranır. Daha sonra bazı özel yazılımlar ile CT veya MR verileri HPÜ cihazları ile imal edilecek STL formatına çevrilir. Son olarak bu veriler kullanılarak istenilen model inşa edilir (Şekil 3.15).

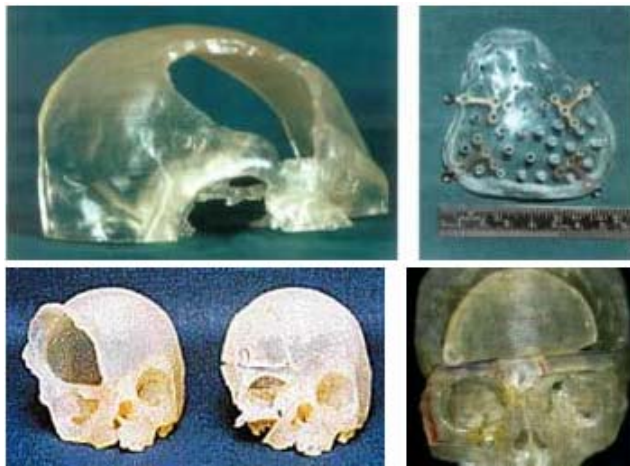


Şekil 3.15. HPÜ teknolojisinin medikal uygulama safhaları [6, 26]

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 3.29, Resim 3.30).

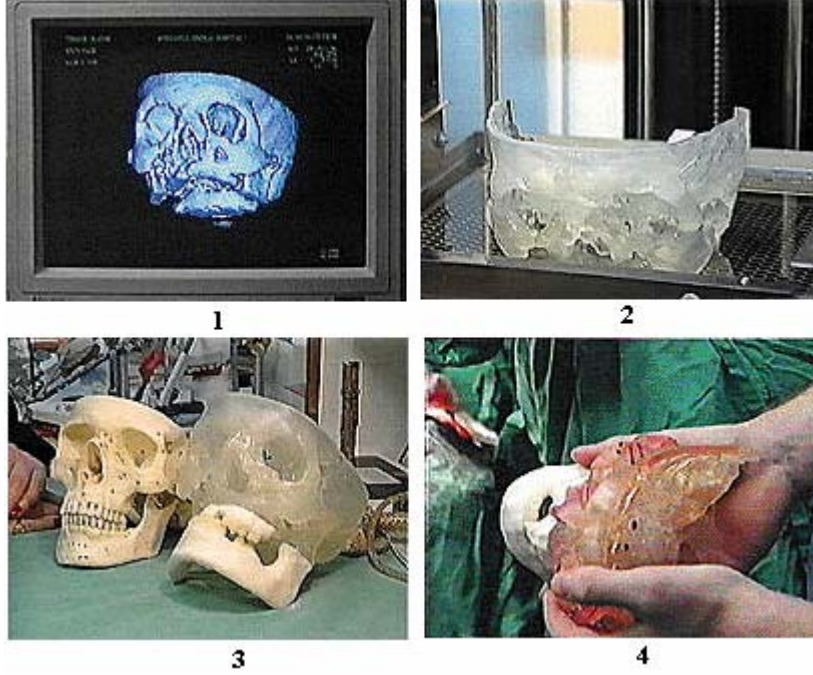


Resim 3.29. Ameliyat planlamasında kullanılmış beyin ve kafatası modelleri [6, 26]



Resim 3.30. Ameliyat planlamasında kullanılmış kafatası modelleri [6, 26]

Yine aynı yöntemle elde edilen çene ve yüz modelleri sayesinde çene ve yüz cerrahisinde gerçekleştirilen ameliyatlara planlanabilmektedir (Resim 3.31).



Resim 3.31. Ameliyat planlamasında kullanılmış çene ve yüz modelleri [6, 26]

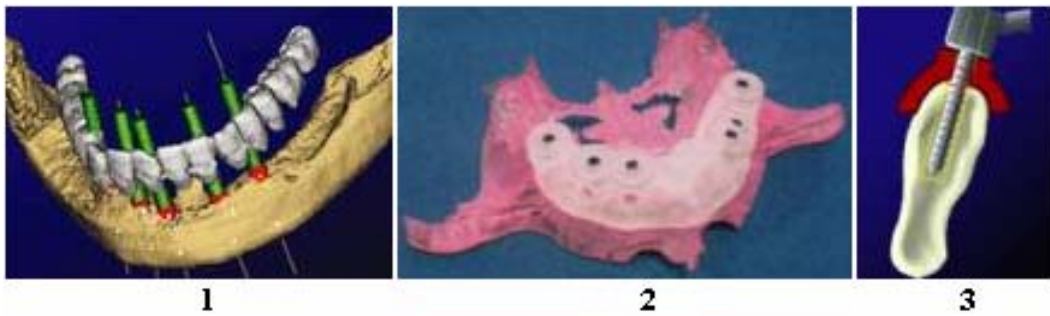
HPÜ teknolojileri kullanılarak eğri diş yapısını düzeltmek için metal tel yerine şeffaf plastikten diş doğrultma kılıfları imal edilebilmektedir. Bu yöntemde tomografi kullanılarak hastanın diş arklarının üç boyutlu modeli bilgisayara aktarılır. Daha sonra ortodontik tedavi sonunda dişlerin ark içinde alması gereken düzgün pozisyonu ve bu pozisyona ulaşmaya kadar gerçekleşecek olan tüm ara durumlar özel geliştirilmiş bir CAD yazılımı (ClinCheck) ile hesaplanmaktadır. ClinCheck programı ile ortodontik tedavi planı yapılmakta, bu plan çerçevesinde kaç tane ara durum olacağı hesaplanmakta ve bu ara durum sayısına göre ‘Aligner’ üretilmektedir. ‘Alignerlar’, yaklaşık iki haftada bir değiştirilecek olan; beyazlatma apareylerinde kullanılanlara benzer apareyler olup, termoform kalıp şeklinde SLA cihazları ile doğrudan imal edilmektedir. Ortodontik tedavi amacıyla üretilen Alignerlar yaklaşık iki hafta süre ile sırasıyla hasta tarafından kullanılmak suretiyle hedeflenen ortodontik tedavi bitirilmektedir. Her Aligner, termoform kalıplama ile şeffaf, medikal uyumlu bir plastikten üretilmektedir. Alignerlar hareketli apareyler

olduğu için hastanın periodontal bakımını yapabilmesi mümkün olmakta ve konvansiyonel ortodontik tedavi sırasında görülen gingival enflamasyonlarla karşılaşmamaktadır. Ayrıca ‘görünmez braketler’ şeklinde tanımlanan ‘invisalign ortodontik’ tedavi sistemi estetik olması açısından hastalar tarafından tercih edilmektedir. Bu estetik ve hijyenik sistem şimdilik sadece erişkinlerde, orta dereceli çapraşıklıkların düzeltilmesi amacıyla kullanılmaktadır, ancak çocuk hastalar için de ayrı bir çalışma yürütülmektedir. Ortodontik düzensizliğin derecesine göre her tedavi ortalama 20, en fazla ise 60 çift farklı düzeltici Aligner gerektirmektedir.



Resim 3.32. Diş doğrultma kılıfı (Aligner) örneği [6, 26]

Materialise (Belçika) firması, SurgiCase yazılımı yardımıyla implant uygulama tasarımı yapmakta ve planlanan şekilde deliklerin hasta çene kemiğine hassas ve hatasız bir şekilde delinebilmesi için ise hastaya özel delme kılavuzlarının üç boyutlu tasarlanmasını sağlamaktadır. Daha sonra bu klavuzlar SLA cihazları yardımıyla üretilmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. İmplant delme kılavuzlarının imalatı safhaları [6, 26]

CYNOVAD (Kanada) ile 3D Systems arasında yapılan ve 26 Eylül 2001’de duyurulan bir anlaşmayla ThermoJet cihazları WaxPro markası altında diş laboratuvarlarında protez ve takma diş modelleri üretmek için pazarlanmaya başlamıştır. Önceleri el işçiliği gerektiren mum model hazırlama işi böylece otomatize edilmiştir. Bu iş için CYNOVAD tarafından geliştirilmiş olan özel bir 3B tarayıcı cihaz ve protez tasarım yazılımı kullanılmaktadır (Resim 3.33).



Resim 3.33. HPÜ teknolojisi ile diş protezi imalatı ve inşa edilen mum model [6, 26]

HPÜ teknolojileri sayesinde, seramik tozu yüklenmiş kağıt kullanılıp inşa sonrası fırında sinterlenerek doğrudan insan vücudunda kullanılacak protezler imal edilebilir. Hatta kemiğin iç malzeme yapısı istenildiği gibi kontrol edilerek mukavemet ve biyolojik uyumluluk açısından optimum bir sonuca ulaşılabilir (Resim 3.34, Resim 3.35).

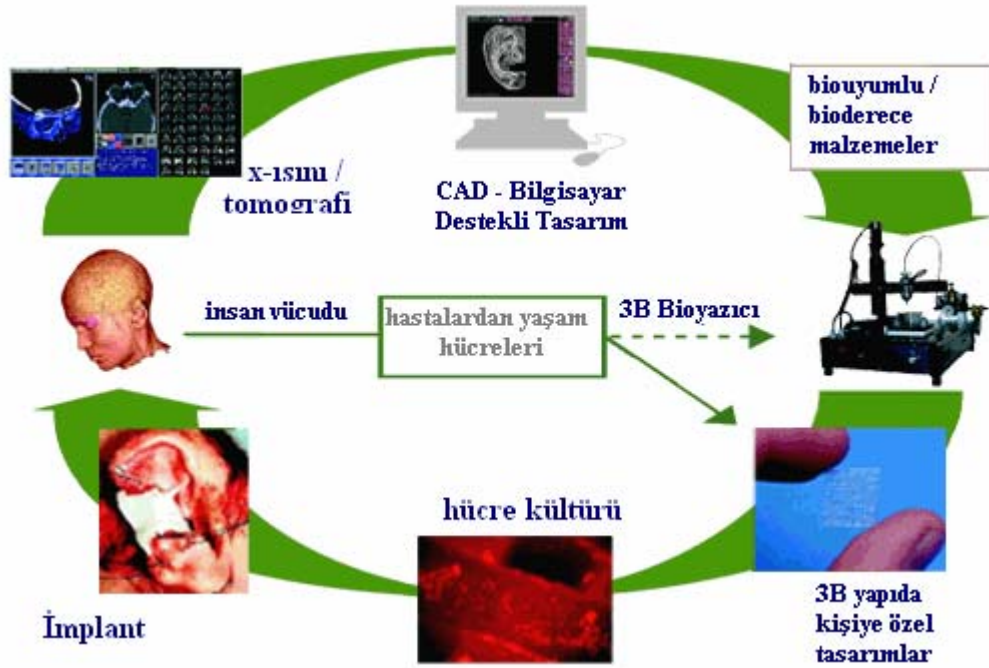


Resim 3.34. HPÜ teknolojisi ile kağıt ve yapıştırıcıdan imal edilmiş bir insan kemiği modeli [6, 26]



Resim 3.35. Özürlü bir Ayağın SLA ile inşa edilmiş modeli [6, 26]

Bioplotter adı verilen HPÜ teknolojisi ile steril ortamda, canlı hücreler inşa malzemesi olarak kullanılarak üç boyutlu suni doku üretilebilmektedir. Sıvayarak harç yığıma prensibine göre çalışan Bioplotter HPÜ cihazının başlıca uygulama alanlarından biri, doku kaybı olan bir uzvun estetik ameliyatı sırasında kullanılmak üzere implant üretmektir. Gerekli hücreler hastanın kendisinden alınabilir. Hücrelerin doğrudan inşa malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra, büyümelerine müsait maddelerden Bioplotter ile üretilen gözenekli bir yapıya sonradan yerleştirilerek de implant üretilebilir. Cihaz için gerekli 3B geometri verisi CT veya MR tarama verilerine dayanarak özel 3B tasarım yazılımlarıyla yapılmaktadır. Bunun dışında, HPÜ teknolojisinin yeni uygulamalarında suni deri imalatıyla, hastanın derisindeki yanık yaralarının daha hızlı düzelmesinde başarılı olunmuştur (Şekil 3.17).



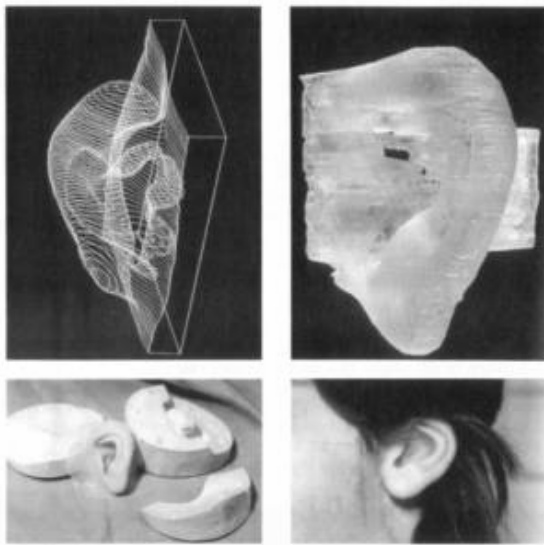
Şekil 3.17. Bioplotter implant uygulaması iş akışı [6, 26]

HPÜ teknolojileri karmaşık iç geometriye ve özel malzeme dağılımına sahip ilaç kapsüllerinin inşasında kullanılmaktadır. Bu uygulamada inşa hammaddesi olarak çeşitli ilaç tozları ve bağlayıcılar kullanılır. Böylelikle birden fazla malzemeden oluşan özel bir kapsül imal edilip hastaya yerleştirilecek ve ilaç maddesi 6 ay veya 1 sene bir sürede yavaş yavaş hastanın kanına karışacaktır. Bu sayede sürekli ilaç

kullanması gereken hastalar için büyük kolaylık olacaktır. 3D Printing cihazı 32 memeden malzeme püskürtebilmektedir ve saatte 60,000 adet tablet üretme kapasitesine sahiptir.

Estetik ve Rekonstrüktif cerrahi uygulamalarında sayesinde hastanın kopan veya kanserli vs. olduğu için ameliyatla alınan bir uzvunu CT veya MR verisine bağlı olarak yeniden tasarlanıp HPÜ cihazları ile karmaşık geometriye sahip modeli rahatlıkla üretilebilir. Bu model kullanılarak silikon kalıplama yöntemiyle uygun bir malzemeden protez imal edilebilir. Bir kulağını kaybetmiş bir hastaya, diğer kulağının 3B verisine bağlı olarak yeniden kulak protezi yapılabilir.

Şekil 3.18’de kanserli dokunun alınması için yapılan ameliyatla sol kulağını kaybeden bir hastaya ABD'ndeki Chigago Üniversitesi'nin koordinasyonunda yapılan sağ kulak protezinin safhaları görülmektedir: İlk resimde sağ kulağın lazer ile tarama sonuçları görülmekte. İkinci resimde, 3B CAD programı kullanılarak "ayna görüntüsü" (mirror image) alınan bu tarama verisine bağlı olarak SLA tekniği ile üretilmiş sol kulak modeli görülmekte. Üçüncü resimde, önceki model kullanılarak yapılmış bir kalıp ve bu kalıba dökülmüş silikon protez görülmektedir. Son resimde ise renklendirme sonrası hastaya başarıyla uygulanmış sol kulak protezi görülmektedir.



Şekil 3.18. 3B verisine bağlı olarak yeniden kulak protezi inşası [6, 26]

HPÜ teknolojileri sayesinde kişiye özel işitme protezi gövdesi imal edilebilmekte ve doğrudan montaj sonrası hastada kullanılabilmektedir.

Kanser sebebiyle boğaz etinin bir kısmı alınmış olan hastanın kalan boşluğuna 3B CT verisine bağlı olarak bir protez yapıp yerleştirilebilir. 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.

Kalp rahatsızlığı olan hastanın tomografi verisine göre bilgisayarda uygun bir kalp kapakçığı tasarlanabilir. Daha sonra uygun bir HPÜ cihazında mum bir kapak modeli inşa edilir. Bu parça daha sonra hassas döküm ile titanyum vb. özel malzemelere dönüştürülebilir. Böylece HPÜ teknolojisi yardımıyla hastaya özel, kalp kapakçığı imalatı gerçekleştirilebilir.

Eğitimde yararlı olabilecek ve elde tomografi verisi olan her model rahatlıkla ve istenilen ölçekte HPÜ teknolojisi ile imal edilebilir. İlk model üretildikten sonra istenilirse silikon kalıplama yöntemleriyle daha fazla kopya, farklı plastik malzemeler kullanılarak imal edilebilir. İnşa öncesinde, bilgisayar ile model üzerinde eğitime yardımcı olacak tarzda istenilen değişiklik kolayca yapılabilir. Az bulunan cinsten bazı kemik veya yumuşak doku hastalıklarında sadece hastanın tomografisinin elde olması yeterlidir. Kadavra kullanımı azaltılabilir. Tüm bunlar HPÜ teknolojilerinin sağladığı tıp veya biyoloji eğitiminde kullanılacak model imalatı konuları içinde yer alır.

Kobayların kimyasallara karşı tepkilerinin modellenmesi en önemli araştırma konularından birisidir. ABD'nde, zehirli gazların burundan geçerken kanserojen etkiyi nasıl yaptığını anlayabilmek için kobaylar üzerinde yapılan bir deneyde, burun iç geometrisinin modelini elde edebilmek için bir kobayın burnu kesilerek çevresi plastik ile kaplanmıştır. Sonra bu, 50 mikron aralıklarla kesilerek her kesitin görüntüsü mikroskop ve tarayıcılar ile bilgisayara aktarılmış bilgisayar üzerinde bu kesitler birleştirilerek burun iç yüzeyi dijital olarak elde edilmiştir. Daha sonra bu

veri kullanılarak 3 kat büyütölmüş bir şekilde burun modeli SLA-250 cihazı kullanılarak inşa edilmiştir. Bu sayede araştırmacılar burun modeli üzerinde aerodinamik testler dahi yapma imkanı bulmuşlardır. Fotopolimerin şeffaf olması, testler sırasında hava akışını gözlemlemeyi kolaylaştırmıştır. Ölçüm hassasiyeti yeterli olmayacağı için burun geometrisinin eldesin de tomografi kullanılmamıştır (CT en az 0,1 mm'yi ölçebilir).

Resim 3.36'da görölen ve microTEC tarafından henüz geliştirme safhasında olan 0,65 mm çapında ve 4 mm boyundaki minik denizaltı, gerekli sensör ve kontrol haberleşme sistemleriyle donatıldığında birçok küçük ve dar alanlarda keşif yapmakta kullanılabilecektir. Kuşkusuz bunun en büyük hitap edeceği alan medikal tanı, teşhis ve tedavi uygulamaları olacaktır.



Resim 3.36. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mikro denizaltı [6, 26]

Ayrıca, Osaka Üniversitesi'nde geliştirilen bir başka MikroSTL teknolojisi ile de benzer uygulamaların yapılması hedeflenmektedir

Mikro teşhis ve tedavi cihazları sayesinde sinir sisteminin tahribatının tespiti, gerekli dokulara doğrudan ilaç taşınması, tümörlere doğrudan radyoterapi uygulanması, böbrek ve safra kesesi taşlarının düşürölmesi veya kırılması, hastanın sağlık durumunun içerden eş zamanlı olarak ölçümü ve takibi, gibi birçok teşhis ve tedavi yapılabilir.

3.3.8. Kuyumculuk uygulamaları

HPÜ teknolojileri sayesinde, karmaşık yüzük, küpe, bilezik vb. modellerin zahmetli el işçiliği gerektirmeden imalatı mümkün olabilmektedir. Normalde bir ustanın 1-2

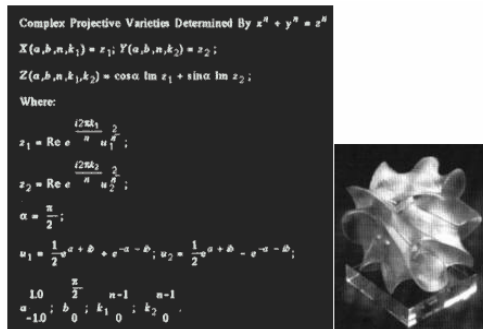
haftada el ile yontarak yaptığı balmumu modeller artık bu cihaz ile 1 günde hatasızca bitebilmektedir. Bunun için tasarımın bilgisayar ortamında bir CAD programı yardımıyla yapılması gerekmektedir. Sonrasında, HPÜ cihazı ile üretilen modeller kullanılarak *hassas fanus döküm* ile istenilen metalden (altın ve gümüş gibi) takılar dökülebilir (Şekil 3.19).



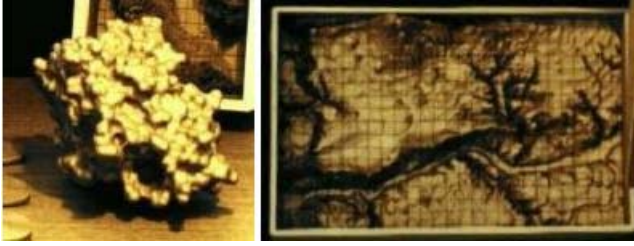
Şekil 3.19. Mücevher tasarım ve imalat uygulamasının aşamaları [6, 26]

3.3.9. Matematik, fizik ve kimya uygulamaları

Aşağıdaki resim ve şekillerde matematik, fizik ve kimya alanlarında karşılaşılan HPÜ teknolojisi kullanılarak oluşturulmuş modeller görülmektedir.



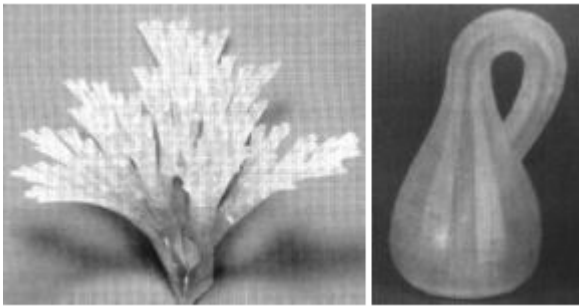
Şekil 3.20. Fermat'ın son teoremi ve bu teoremden $n = 5$ olduğu durumda oluşan yüzeyin SLA ile inşa edilen modeli [6, 26]



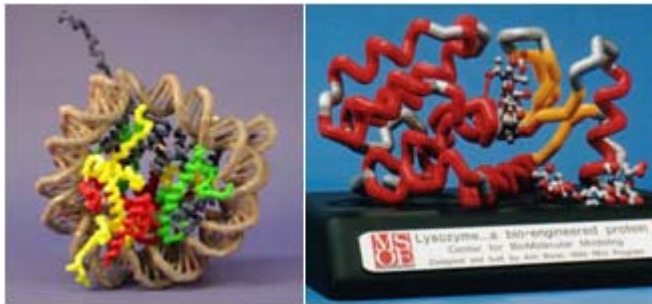
Resim 3.37. Helisys firmasının HPÜ cihazlarıyla inşa edilen bir molekül modeli, ve topografik bir model [6, 26]



Resim 3.38. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mobius bantlarının bir hali [6, 26]



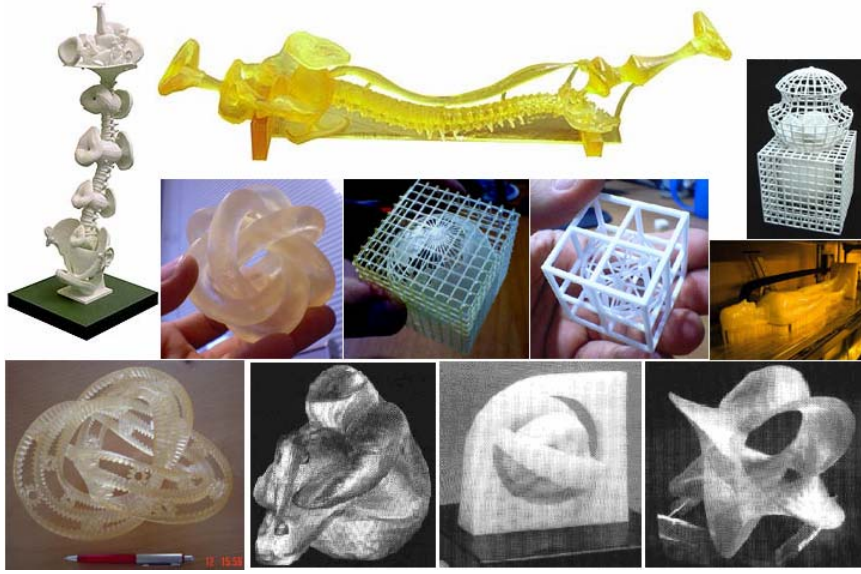
Resim 3.39. SLA teknolojisi ile inşa edilmiş Fraklat ağacı ve Klein şişesi [6, 26]



Resim 3.40. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş Nucleosome ve Lysozyme modeli [6, 26]

3.3.10. Sanat uygulamaları

Normal heykeltıraşlık yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan karmaşık sanat eserlerinin imalatı HPÜ teknolojileri sayesinde kolaylıkla mümkün olmaktadır. Modellerin sahip olduğu kompleks yapı tamamen sanatçının düşüncesinde canlanan öğelere ve yapıya sahiptir (Resim 3.41).



Resim 3.41. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş sanatsal modeller [6, 26]

3.3.11. Mimari uygulamalar

Çok yaygın olmasa da HPÜ teknolojileriyle mimari maketler ve topografik modeller inşa edilmektedir (Resim 3.42).



Resim 3.42. HPÜ teknolojisi ile inşa edilmiş mimari modeller [6, 26]

4. MODEL DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ

HPÜ veya farklı tekniklerle üretilmiş modeller yardımıyla benzer geometriye sahip (pozitif veya negatif) fakat daha mukavemetli ve/veya kullanıma uygun malzeme özelliklerine sahip parça veya kalıp üretiminde kullanılan birçok teknik ve yöntem “*model dönüştürme teknolojileri*” (“conversion technologies”) adı altında toplanmaktadır [6, 26].

Gerçekte bu gibi dönüştürme yöntemleri uzun yıllardır biliniyordu ama asıl problem ilk master modelin hızlı ve hassas biçimde yapılabilmesiydi. Artık çeşitli HPÜ teknolojileri ile bu problem aşıldığı için model dönüştürme yöntemleri sahasında yeni araştırma sahaları yer almıştır. Her geçen gün bu konuda yeni patentler alınmakta ve yeni yöntemler geliştirilmektedir. En yaygın olarak kullanılan model dönüşüm teknolojileri aşağıda açıklanmaktadır.

4.1. Hassas Döküm Teknolojisi

İngilizce’de “Investment Casting”, “Ceramic Shell Casting” (seramik kabuk dökümü) veya “lost wax process” (kaybedilmiş mum prosesi), Almanca’da “Feinguss” veya “Schalenguss”, Fransızca’da ise “Fonde a Cire Perdue” ismiyle anılan hassas döküm tekniğinin 200 yıllık bir geçmişi vardır. Bu teknik sayesinde elde uygun malzemeden yapılmış bir model olduğu sürece çok karmaşık metal dökümler yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi ile yapılabilir. Bu özelliği ile hassas döküm, birçok talaşlı imalat işleminin gereğini ortadan kaldırır [6, 26].

Bu kalıplama yönteminin prensibi, mum ve benzer modeller kullanılarak hazırlanan kalıpların ısıtılması ve eriyen model malzemesinin kalıptan dışarı akıtılarak kalıp boşluğunun oluşturulmasıdır.

Üretilecek parça sayısı kadar modelin gerekli olduğu bu yöntemde mum ve plastik benzeri modeller kullanılır. Modeller, mum veya plastiğin metal bir kalıba enjeksiyonu ile üretilir ve çok sayıda model, ortak bir yolluğa bağlanarak salkım şeklinde düzenlenir. Modellerin oluşturulmasında HPÜ tekniklerinin kullanılması büyük zaman tasarrufu sağlar. Ayrıca en karmaşık parçaların modelleri bile bu

yöntemler kullanılarak çok hızlı bir şekilde üretilir. *Silikon kalıplama* ve *metal püskürtme* işlemleri de hassas dökümde kullanılan mum parçaların oluşturulmasında büyük hız sağlar.

Hassas döküm işlemi pahalı ve zaman alıcı bir işlemdir. Son yıllarda gelişen HPÜ teknolojileri bu işlemi daha kullanılabilir hale getirmiştir. Bir HPÜ teknolojisi olan Üç Boyutlu Baskı (Three-Dimensional Printing) yöntemi kullanılarak seramik kabuk doğrudan üretilir. Bu, işlem akışında oldukça önemli bir hız sağlamaktadır. Böylelikle daha kısa zaman dilimlerinde, daha ucuz parça üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Seçici Lazer Sinterleme (Selective Lazer Sintering) ile hassas dökümde kullanılan mum modeller yerine kullanılabilen polikarbonat tozlar kullanılarak üretilmiş prototipler doğrudan hassas döküm işlemlerinde kullanılabilirler. Böylelikle ara bazı kademelere ihtiyaç duyulmaz.

Hassas döküm teknikleri temelde ikiye ayrılır. Hassas Kabuk Döküm (Investment Shell Casting) tekniğinde; seramik kalıp, ince cidarlı bir kabuk şeklinde modelin etrafını örterken, Hassas Fanus Döküm (Investment Flask Casting) tekniğinde ise bir kabın içindeki kalıp boşluğu haricindeki tüm hacim seramik veya alçı malzeme ile doldurulur.

4.1.1. Hassas kabuk döküm (Investment Shell Casting)

Hassas kabuk döküm prosesi işlem safhaları (Şekil 4.1), [6, 26]:

i) Mum Salkım Hazırlama : Öncelikle, metalden dökülmesi istenilen parçanın balmumu veya benzeri bir malzemedan modeli hazırlanır. Genellikle alüminyum (mücevhercilikte ise silikon) bir kalıp imal edilir ve plastik enjeksiyon yöntemi ile istenildiği kadar mum model elde edilir. Döküm sonrası soğuma ve büzülme tahmini yapılarak model aslından biraz büyük imal edilebilir. Parçalar yine mumdan yapılmış bir gövdeye yapıştırılırlar (Şekil 4.1.a).

ii) Seramik Kaplama : Model, seramik banyosuna batırılarak (sulu alçı görünümünde bir sıvı) çevresine ince bir tabaka kaplanması sağlanır. Seramik tabaka

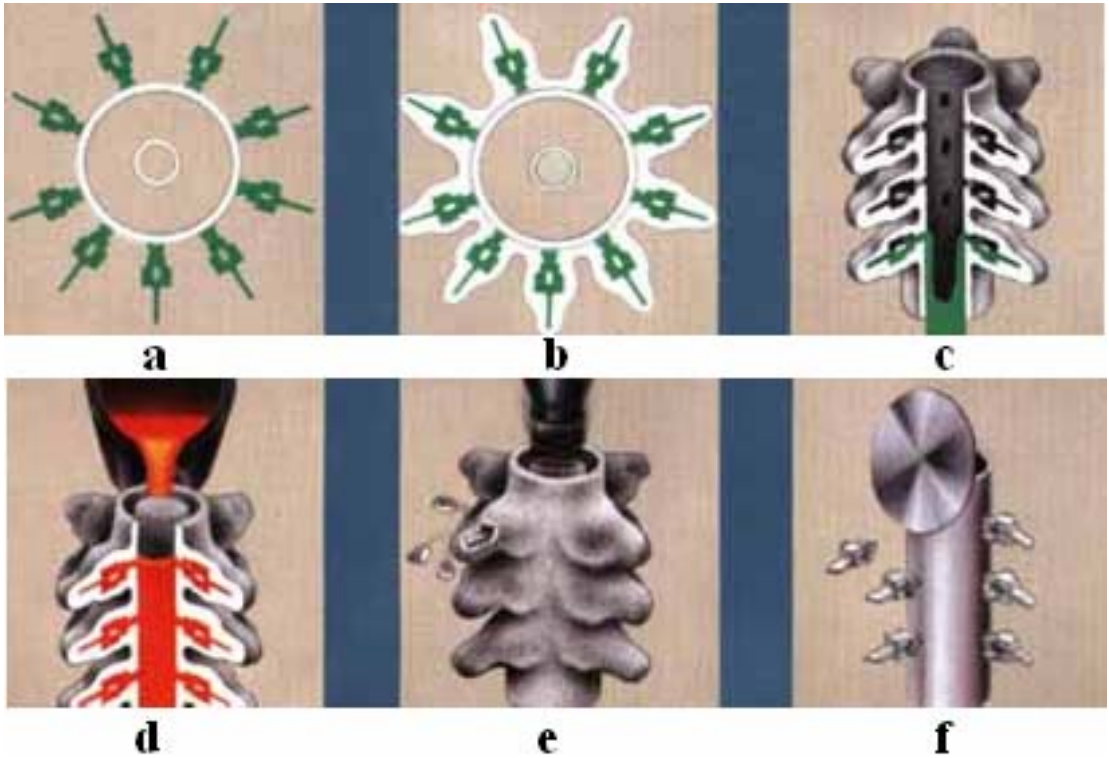
kuruyup katılaşıncaya kadar bir fırında bekletilir. Yeteri kalınlıkta seramik kaplanıncaya kadar son iki işlem tekrarlanır. Dış tabakalarda daha kalın seramik tozu kullanılır (Şekil 4.1.b).

iii) Seramik Kabuktan Mum Boşaltma ve Pişirme : Dış cidarı sert seramik kaplı parça bir fırına sokularak modelin eriyip dışarı akması sağlanır. Seramik malzeme ise yüksek sıcaklığa dayanıklı olduğundan şeklini muhafaza eder. Bu esnada mum modelin akarak çıkmayan kısımları da tamamıyla buharlaşır (Şekil 4.1.c).

iv) Döküm : Modelden kalan boşluğa daha önce bırakılmış bulunan bir ağız ve yolluktan ergimiş halde metal dökülür (Şekil 4.1.d).

v) Kesme ve Temizleme İşlemleri : Metal soğuyup katılaştıktan sonra darbe ile dış cidardaki seramik kırılarak parça ortaya çıkarılır (Şekil 4.1.e). Parçalar ana gövdeden dairesel bir testere ile kesilerek alınır, bir başka deyişle göbek bağları kesilir (Şekil 4.1.f).

vi) Kalite Kontrol İşlemleri : Son olarak gerekli çapak alma ve yüzey parlatma işlemleri yapılarak parça kontrol işlemleri gerçekleştirilir [6, 13-15]



Şekil 4.1. Hassas kabuk döküm işleminin safhaları [6, 26]

Resim 4.1’de, Shellcast Inc. isimli Montreal, Kanada bulunan modern bir hassas kabuk döküm fabrikasına ait bölümler ve bu bölümlerde işlenmekte olan prototip modellerden üretilmiş mum modeller kullanılarak hassas döküm işlemi gerçekleştirilen parçalar görülmektedir [6, 26].

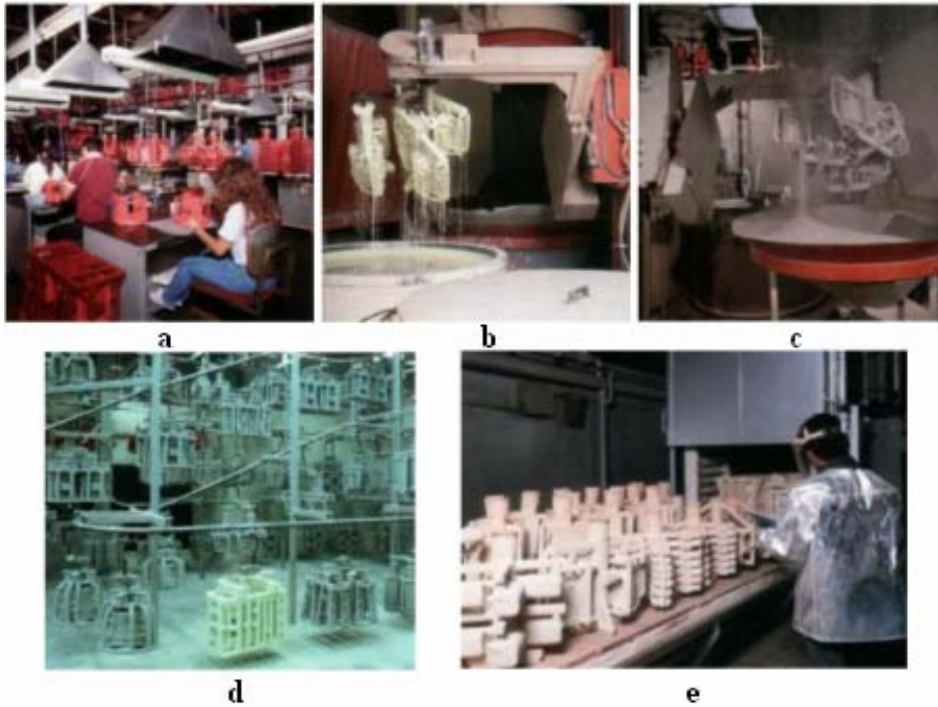
i) Mum model parçaları kontrolden geçirilip monte edilerek daha karmaşık modeller oluşturuluyor; Hassas döküm sektöründe sıkça karşılaşılan karmaşık mum modelleri bir seferde bir enjeksiyon kalıbıyla üretmenin zorluğu veya imkansızlığı sebebiyle iki veya daha fazla mum model parçası ayrı enjeksiyon kalıplarında imal edilir ve manuel olarak birleştirilir (Resim 4.1.a).

ii) Tam otomatik kabuk üretim hattında robot yardımıyla mum model üzerine ince seramik kaplanıyor (Şekil 4.2.b).

iii) Kabuğu sağlamlaştırmak için daha kalın seramik (kum) kaplanıyor (Resim 4.1.c).

iv) Kabuk oluşturma işlemlerinin ara safhalarında nem ve sıcaklık kontrollü ortamda kabuklar kurutuluyor (Resim 4.1.d).

v) Seramik kabukların kür edildiği tünel fırın (Resim 4.1.e).



Resim 4.1. Modern bir hassas kabuk döküm fabrikası [6, 26]

Resim 4.2’de Kanada’da bulunan, Shellcast Inc ve ABD’ de bulunan Precision Castparts Corp. Firmalarında HPÜ teknolojilerinden faydalanılarak inşa edilmiş modeller kullanılarak hassas döküm işlemi ile üretilmiş askeri alanda kullanılan elektronik cihaz gövdeleri ve jet türbin parçalarından örnekler görülmektedir.

Şekil 4.2’de HPÜ teknolojileri teorinse dayalı olarak geliştirilen doğrudan kabuk imalatıyla hassas döküm işlemi görülmektedir. Bu teknik sayesinde seramik tozundan faydalanılarak hassas döküm işleminde kullanılmak üzere kalıplar doğrudan inşa edilebilmektedir. Soligen’in DSPC (Direct Shell Production Casting, Doğrudan Kabuk İmalatıyla Döküm) tekniğinde önce üretilecek parçanın CAD verisi kullanılarak hassas döküm ağacı ve seramik kabuk üç boyutlu olarak bilgisayardaki özel bir yazılımla tasarlanır. Ardından, DSPC cihazında bir merdane ile ince bir tabaka halinde yayılan seramik tozu, özel bir yapıştırıcı sıvının yüzlerce memeden oluşan bir püskürtme kafasıyla püskürtülmesiyle istenilen noktalarda birbirlerine bağlanır. Tüm döküm ağacı bu işlemlerin defalarca tekrarlanmasıyla katmanlar halinde inşa edilir. Son olarak, destek malzemesi görevini üstlenmiş olan gevşek tozlar boşluklardan dökülür ve doğrudan kabuk imalatından faydalanılarak hassas döküm tekniği ile metal parçalar imal edilmiş olur. (Şekil 4.4).

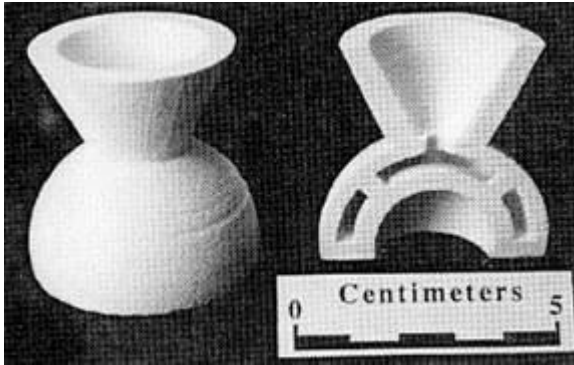


Resim 4.2. Askeri elektronik cihazların kasaları ve jet türbin parçalarından örnekler [6, 26]



Şekil 4.2. Doğrudan kabuk imalatıyla döküm tekniğinin safhaları [6, 26]

Resim 4.3’de seramik tozu kullanılarak imal edilmiş bir hassas döküm kalıbı ve kesiti görülmektedir. Görüldüğü gibi inşa sırasında parça içinde boşluk bırakılabilmektedir. Parçanın üst kısmında yer alan huni şeklindeki unsur ise erimiş metalin kalıba rahat dökülmesi için verilmiştir.



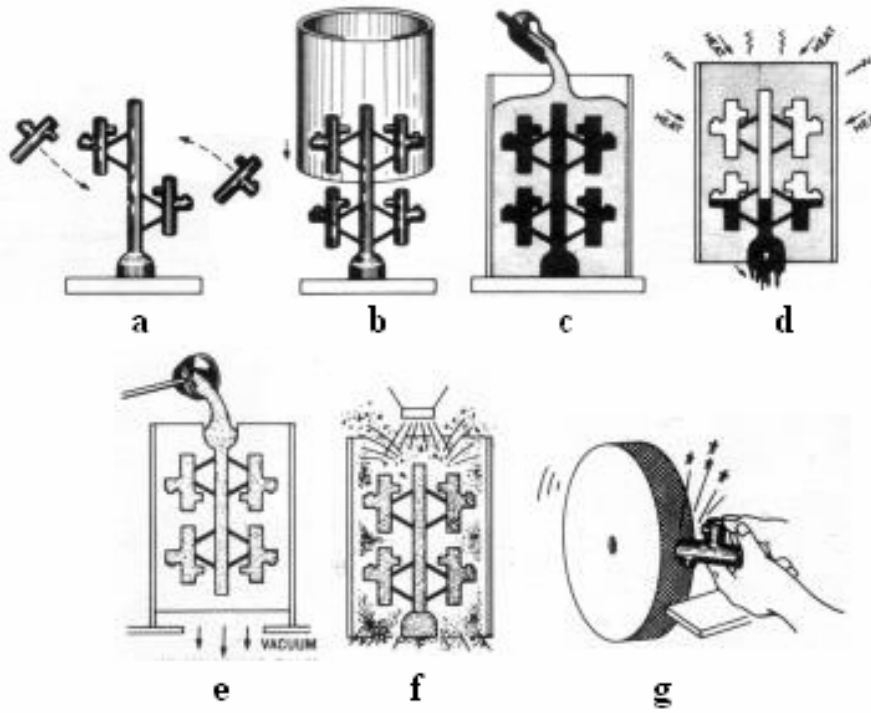
Resim 4.3. Seramik tozu kullanılarak imal edilmiş bir hassas döküm kalıbı ve kesiti [6, 26]

4.1.2. Hassas fanus döküm (Investment Flask Casting)

Hassas fanus döküm prosesi işlem safhaları (Şekil 4.3), [6, 26];

- i) Mum modeller model ağacına eritilerek yapıştırılır (Şekil 4.3.a).
- ii) Silindirik bir gömlek (fanus) model ağacı etrafına geçirilir (Şekil 4.3.b).
- iii) Gömlek ile model ağacı arasındaki tüm boşluklara alçı/seramik karışımı kompozit malzeme dökülür (Şekil 4.3.c).

- iv) Fırında ısıyla karışım kurutulur ve kalıp ters çevrilerek içindeki mum modellerin eriyip akması sağlanır (Şekil 4.3.d).
- v) Sıcak kalıp ergimiş metal ile doldurulur. Vakum veya merkezkaç kuvvetiyle döküm kolaylaştırılabilir (Şekil 4.3.e).
- vi) Basınçlı su püskürterek kalıp malzemesi temizlenir (Şekil 4.3.f).
- vii) Döküm ağacından koparılan parçalar malzeme giriş çapakları temizlenerek döküm sonrası kullanıma hazır hale getirilirler (Şekil 4.3.g).



Şekil 4.3. Hassas fanus döküm işleminin safhaları [6, 26]

HPÜ teknolojileri ile karmaşık döküm modellerinin daha kolay yapılabilmesi sayesinde hassas fanus döküm teknolojisinin daha yaygın kullanımına ihtiyaç duyulmuş ve bu ihtiyacı Alman *MCP-HEK GmbH* firması geliştirdiği, bir seri cihazdan oluşan ve küçük bir atölye alanına kolaylıkla kurulabilecek "*MCP Metal Part Casting*" isimli paket bir çözümle karşılamıştır [6, 26].

MCP Metal Part Casting sisteminin uygulaması (Resim4.4) [6, 26];

- i) Mum modeller havya ile eritilerek yine mum malzemedan yapılmış model ağacına bağlanır (Resim4.4.a).
- ii) Fanus, döküm ağacının çevresine yerleştirilir (Resim4.4.b).
- iii) Fanus, vakum altında seramik veya alçı ile doldurulur (Resim4.4.c).
- iv) Fanus, kurutma fırınından çıkarılır. Fanus, çevresindeki bulunan delikler sayesinde seramik veya alçı malzemenin su buharı kaybetmesini kolaylaştırır (Resim4.4.d).
- v) Mum eritme ve metal döküm sonrası fanus çıkartılır (Resim4.4.e).
- vi) Basınçlı su ile seramik veya alçı temizlenir. Fanus çevresindeki delikler bu sefer de su ile seramik veya alçı dolgunun eritilmesini kolaylaştırmaktadır. Temizlik esnasında çevreye su ve diğer artıklar sıçramaması için bu işlem özel bir kabinin içinde yapılır (Resim4.4.f).
- vii) Basınçlı su ile temizlenen parça temizleme kabininden çıkarılır (Resim4.4.g).
- viii) Metal dökülmüş parçalar döküm ağacından koparılmaya hazır hale gelir (Resim4.4.h).



Resim 4.4. MCP Metal Part Casting sisteminin uygulama safhaları [6, 26]

Resim 4.5’de MCP kiti kullanılarak imal edilmiş parça, bu parçaya ait HPÜ modeli ve mum model görülmektedir.



Resim 4.5. MCP Metal Part Casting sistemine örnek bir çalışma [6, 26]

4.2. Silikon Kalıplama Teknolojisi

Silikon kalıplama sayesinde pahalı ve uzun süren metal kalıp imalatı yerine bir master model kullanarak daha ucuz ve hızlı bir şekilde sınırlı sayıda parça imal edilebilir. Master model, HPÜ teknolojileri kolaylıkla elde edilebileceğinden kısa sürede ve düşük maliyet ile istenilen mekanik ve optik özelliklere sahip sınırlı sayıda parçalar üretilebilir.

Bu tekniğin uygulaması için son yıllarda önemli gelişmeler kaydedilen iki temel malzeme teknolojisi vardır [6, 26, 36];

Kalıp Malzemesi (silikon): Sıvı halden katı lastik haline kısa sürede ve büzülme-şişmeye uğramadan geçebilen şeffaf silikon malzemelerin geliştirilmesidir. Silikonun kür olması için yüksek sıcaklıklı fırınlar kullanılabileceği gibi yeni üretilen, RTV (Room temperature vulcanizing - oda sıcaklığında vulkanize olan) silikonlar bu tip bir fırınlama ihtiyacını da ortadan kaldırır.

Prototip Malzemesi (epoksi, poliüretan): Sıvı halde bulunan iki kimyasal birbiriye karıştırılarak kısa sürede oluşan bir kimyasal reaksiyonla katı hale (seri imalatla

kullanılan birçok termoplastiğin mekanik özelliklerine benzer bir yapıya) dönüşebilir. Bu maddelerle şeffaf ve elastik parça da üretilebilir.

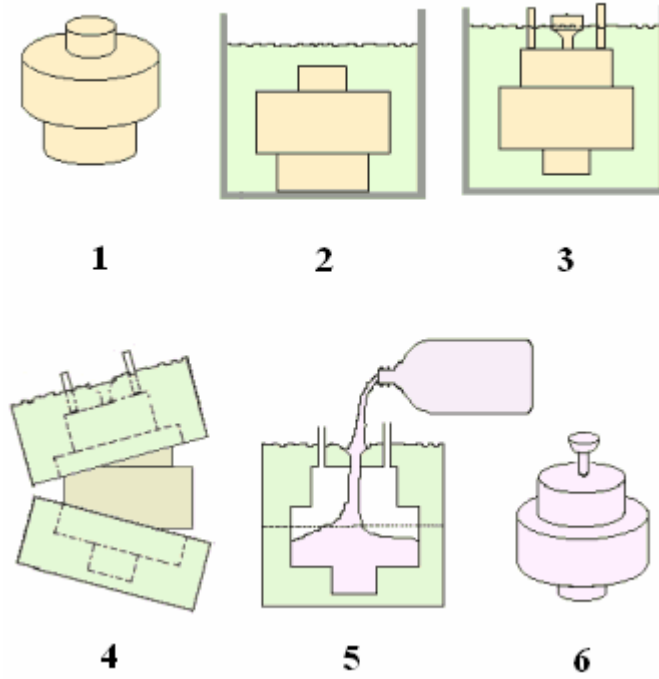
Silikon kalıplama 4 aşamada gerçekleşir (Şekil 4.4) [6, 26, 36];

i) Master bir model (Şekil 4.4.1) etrafına silikon dökülerek (Şekil 4.4.2) oda sıcaklığında veya bir fırında daha yüksek sıcaklıklarda silikonun daha hızlı katılaşması (vulkanize olması) sağlanır. Silikonda hava kabarcığı kalmaması için bu işlem vakum altında yapılabilir. Model üzerine hava çıkış kanalları bu esnada bağlanır (Şekil 4.4.3).

ii) Silikon kesilerek master model çıkarılır (Şekil 4.4.4). Modelin karmaşıklığına göre ikiden fazla silikon kalıp parçası oluşabilir. Yeniden silikon parçalar birleştirilerek kalıp boşluğu (modelin negatif geometrisi) oluşturulur. Sıvı haldeki silikonun her türlü detaya girmesi sayesinde model üzerindeki parmak izleri kadar küçük pürüzler bile mükemmel olarak kalıba yansır.

iii) Sıvı haldeki hammadde bu boşluğa dökülür (Şekil 4.4.5). Silikon esnek bir malzeme olmasına rağmen döküm çok düşük basınçlarda genellikle sadece yerçekimi kuvveti altında gerçekleştiği için kalıpta hassasiyete zarar verecek ölçüde bir esneme veya deformasyon olmaz. Döküm sonrası sertleşme kimyasal reaksiyonla veya (mum model imalatı örneğinde olduğu gibi) soğuma ile gerçekleşir. Malzemenin erime sıcaklığının silikona zarar vermeyecek seviyede düşük olması gerekir.

iv) Silikon kalıp açılarak parça çıkarılır (Şekil 4.4.6). Silikonun esnekliği sayesinde ters açığa sahip bile olsa silikon kalıp esnetilerek parçadan kolaylıkla ayrılabilir. Böylece maçalı bir metal kalıp ile üretilecek bir parçanın prototipi maçasız bir silikon kalıpla rahatlıkla üretilebilir.

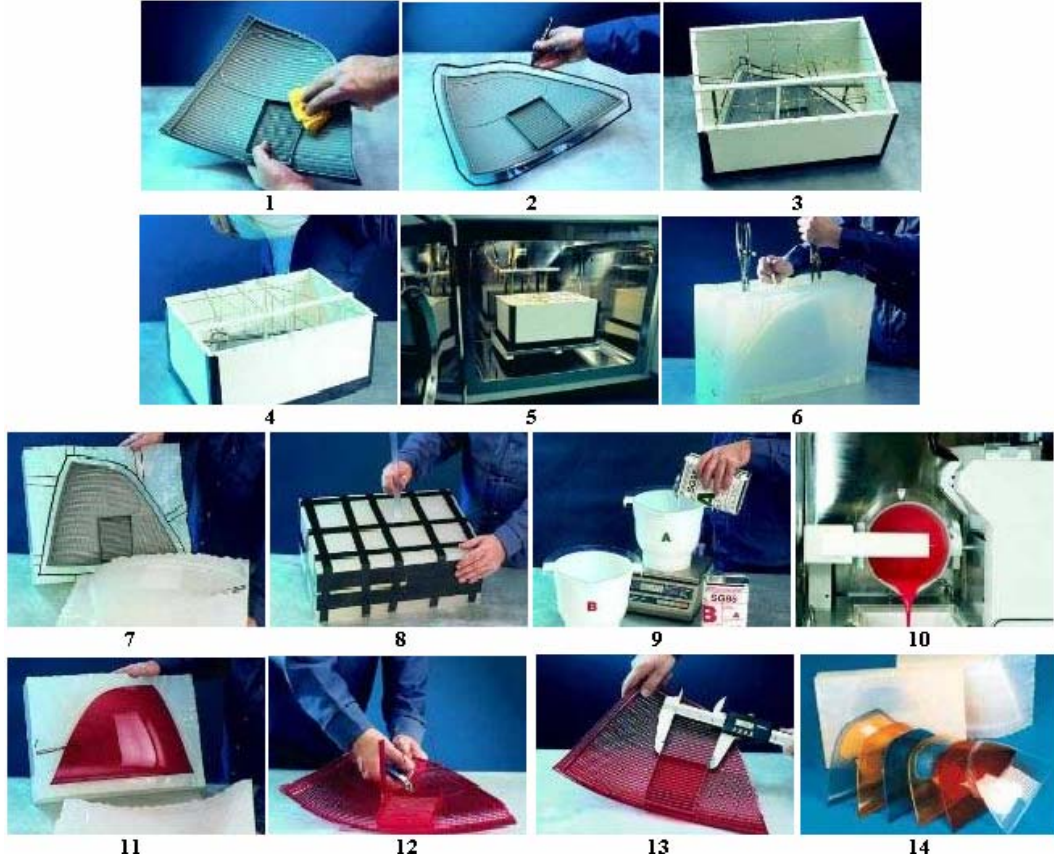


Şekil 4.4. Silikon kalıplama işleminin safhaları [6, 26]

Şekil 4.6’da, silikon kalıp cihazları ve malzemeleri sunan başlıca firmadan biri olan *MCP-HEK GmbH* firmasının örnek bir uygulaması detaylarıyla birlikte verilmektedir [6, 26].

- i) Çoğaltılması istenen bir otomobil far kapağı modeli, silikon kalıplama hazırlığı için öncelikle temizlenir, gerekirse belli kalıp ayırıcı sıvılarla kaplanır (Resim 4.6.1).
- ii) Modelin kalıp ayırma kenarlarına şeffaf bant yapıştırılır ve bantın kolay görülebilmesi için keçeli bir kalemle boyanır (Resim 4.6.2).
- iii) Model, bir kaba tellerle askıya alınarak yerleştirilir. Hava tahliye kanalları bu safhada düşünülerek modele eklenmiştir (Resim 4.6.3).
- iv) Silikon, model etrafına dökülür (Resim 4.6.4).
- v) Vakum altındaki ve ısıtılan bir fırında hava kabarcığı alınarak silikonun hızlı bir şekilde vulkanize (kür) olarak sertleşmesi sağlanır (Resim 4.6.5).
- vi) Sertleşen silikon falçata ile kesilir. Bu esnada, 2. safhada yerleştirilen kenarı boyalı bant kolaylık sağlar (Resim 4.6.6).

- vii) Silikon kalıp ayrılarak master model çıkartılır (Resim 4.6.7).
- viii) Kalıp, döküm için yeniden kapanır. Hem ayırma kolaylığı hem de silikonun ömrünü uzatmak için bazı kalıp ayırıcılar silikon iç yüzeyine tatbik edilebilir. Bant kullanılarak sıkıca parçalar birbirine bağlanır (Resim 4.6.8).



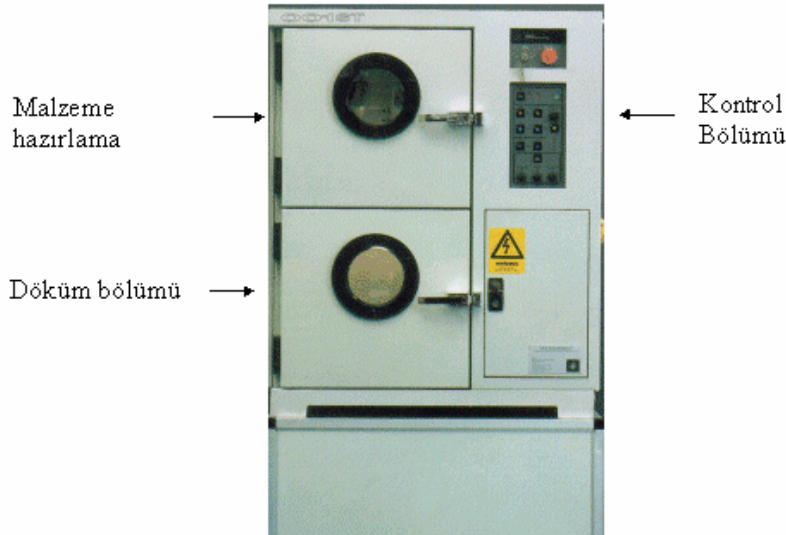
Resim 4.6. Silikon kalıplama işlemi uygulama örneği [6, 26]

- ix) Tartılarak gerekli ölçüde parça malzemesi birbirine karıştırılır (Resim 4.6.9).
- x) Kabarcıkları önlemek için bir vakum odasında döküm gerçekleşir (Resim 4.6.10).
- xi) Kısa sürede sertleşen malzeme silikon kalıptan ayrılır (Resim 4.6.11).
- xii) Malzeme giriş ve hava çıkış kanallarında biriken sertleşmiş malzeme kesilerek parça temizlenir (Resim 4.6.12).
- xiii) Üretim sonrası hassasiyet ve tolerans kontrolü yapılır (Resim 4.6.13).
- xiv) Aynı kalıpla değişik renkte far modelleri üretilebilir (Resim 4.6.14).

Resim 4.7’de silikon kalıp kullanımına dair örnekler ve Resim 4.8’de silikon kalıplarına vakum altında dökümün yapıldığı sistem görülmektedir [6, 26].



Resim 4.7. Silikon kalıp kullanımına dair örnekler [6, 26]



Resim 4.8. Silikon kalıplarına vakum altında dökümün yapıldığı sistem [6, 26]

Silikon kalıplama işlemi modeli oluşturulmuş parçaların çoğaltılması için uygun bir yöntemdir. Silikon kalıbın üretimi yaklaşık 2 saat ve her parça için 40 dk. zaman gereklidir. Bu yöntemde prototipi üretilmiş bir parçanın asıl malzemesinden veya ona yakın bir malzemeden üretilmesi mümkündür. Böylelikle hızlı bir şekilde parça çoğaltılması yapılabilmekte veya benzer malzemeden parçalarla testler yapılabilmektedir. Bir silikon kalıpta poliüretan malzemelerin dökülmesi durumunda 20-30 adet parça, mum dökülmesi durumunda ise 30-50 adet parça dökülebilmektedir. Görüldüğü gibi bu yöntemde en büyük dezavantaj kalıp ömrünün kısa olmasıdır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Günümüz imalat sektöründe kullanılmakta olan üretim tekniklerinde karşılaşılan ve en önemli kriterlerden birisi olan “hangi imalat, hangi yöntem veya yöntemlerle , hangi tezgah veya tezgahlarda yapılmalı?” sorusu HPÜ teknolojilerini de kapsamı içine almaktadır. Buradan da anlaşılmaktadır ki prototip üretimindeki zaman ve dolayısıyla maliyetler önemli ölçülerde yer değiştirmektedir. Bu kriter günümüz dünyasında imalat endüstrisinin Ar-Ge çalışmalarında en çok üzerinde durduğu noktalardan biridir. Bu veriler ışığında gerçekleştirilen çalışma kapsamında gerçek anlamda kıyaslama hatalarını azaltıcı özelliklere sahip model, laboratuvar şartları, ölçüm sistemleri, analiz yazılımları, HPÜ inşa cihazları gibi materyal ve yöntemlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında elde edilen bulgular ile yukarıda bahsedilen sorunun cevabı yapılan bu çalışma kapsamında irdelenmiştir

5.1. Deney Modeli Seçimi

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında seçilen model, çalışmanın amacına uygun olarak, üzerinde alışılmış ve/veya alışılmamış imalat teknikleri ile imal edilebilirliği zorlayıcı unsurlar içermektedir. Bu unsurların imalatı literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde; alışılmış ve/veya alışılmamış imalat teknikleri tercih edilse bile model üzerinde yer alan bir çok unsur yalnız bir imalat yöntemi seçilerek ve en önemlisi parçanın konumunu değiştirmeden bir kerede üretilmemekte olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında kullanılan en kritik materyal olan model, üzerinde geleneksel ve/veya geleneksel olmayan yöntemler tercih edildiğinde imalatı zorlayıcı ve kısıtlayıcı unsurlar içermektedir. Bununla birlikte modelin ölçeği olabildiğince küçük boyutlarda tercih edilerek kompleks yapıda olan unsurların inşa sonrası imalat verimliliği minimize boyutlarda test ve analiz edilmiştir.

Geliştirilen modelin sahip olduğu fiziksel özellikler;

Boyutlar : 50x50x20 mm

Hacim : 21251 mm³

Yüzey Alanı : 12258 mm²

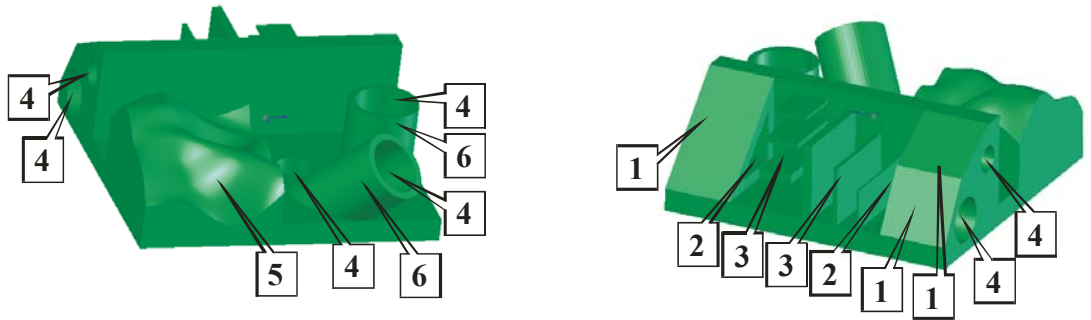
şeklinde özetlenebilir.

Geliştirilen modelin üzerinde bulundurduğu unsurlar Şekil 5.1’ de görülmektedir. Şekil 5.1’ de ifade edilen rakamlar;

- 1- Açılı yüzeyleri
- 2- İçi boşaltılmış unsurları
- 3- Yatay ve dikey konumlandırılmış ince cidarlı federleri
- 4- Yatay, dikey ve açılı kör delikleri
- 5- Serbest Form Yüzeyleri
- 6- Açılı ve dikey silindirik unsurları

ifade etmektedir.

Şekil 5.1’de tanımlanan model üzerinde görülen unsurların form yapıları incelendiğinde seçilen tüm bu formlara sahip unsurların tercih edilmesinde önemli bir amaç olduğu bilinmesi gerekmektedir. İşte bu amaç HPÜ teknolojilerinin sahip olduğu parça inşa yöntemi prensiplerinin mantığından kaynaklanmaktadır. Çünkü HPÜ yöntemlerinin tümü alışılmış ve alışılmamış imalat yöntemlerinin aksine “var olan bir malzeme üzerinden farklı özelliklere sahip kesiciler ile parça kaldırarak o malzemenin unsurlarının meydana getirilmesi” prensibine tamamen ters bir mantığına göre çalışmaktadır. Çünkü HPÜ teknikleri, tıpkı bir binanın temelinden çatısına kadar inşa edilmesi gibi, parçanın oluşumunu sağlayacak unsurları en alt noktadan en üst noktaya kadar katmanlar halinde oluşturulması prensibi ile çalışır.



Şekil 5.1. Geliştirilen deney modeli ve üzerinde bulunan kompleks unsurlar

HPÜ teknikleri modeli katmanlar halinde inşa prensibi ile oluşturduğuna göre 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 yöntemleri sonrası yöntemin, malzemenin ve inşa cihazının özelliklerine göre imal edilebilirliği, ölçü hassasiyetini ve üretim zamanı kriterlerini kıyaslamada bizim doğru ve yararlı sonuçlara ulaşmamızı sağlamıştır.

5.2. Değerlendirme Kriterleri

Bu çalışma kapsamında 4 farklı HPÜ tekniği kullanılarak üretilen modeller 4 ana kriter başlığı altında incelenmiştir. Bu kriterler; *Üretilebilirlik*, *Ölçü Tamlığı*, *Yüzey Hassasiyeti*, ve *Üretim Zamanı* olarak belirtilebilir.

Parça inşa safhalarının tamlanmasıyla sonra üretilebilirlik kriteri, farklı HPÜ cihazlarında inşa edilen her bir model üzerinde bulunan unsurların oluşumları incelenerek tespit edilmiştir.

Üretilen modellerin ölçü tamlığı, CMM ölçüm cihazı ve yüksek hassasiyetli ölçüm ekipmanları kullanılarak deney modeli üzerinden farklı noktalardan ölçüm yapılarak araştırılmıştır.

Üretilen parçaların yüzey kalitesi ve hassasiyeti aynı laboratuvar şartlarında farklı prototipler için aynı ölçüm noktaları üzerinde MAHR marka Perthometer M1 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen modeller üzerinde 5,6 mm lik ölçüm uzunluğunda 3 farklı referans yüzey seçilerek her bir ölçüm 5 kere tekrarlanmış ortalama değerler referans alınarak yüzey pürüzlülüğü değerleri tespit edilmiştir. Bu referans yüzeyler düzlemsel yatay, düzlemsel dikey ve açıl formlu yüzeylerdir.

Diğer bir ölçüm kriteri olan üretim zamanı ise üretimi yapılacak olan modele ait STL datasının ön hazırlık işleminden başlayıp, inşa sonrası destek yapılarının temizlenip modelin ortaya çıkışına kadar geçen süre dikkate alınarak incelenmiştir.

5.3. Deney Kapsamında Kullanılan HPÜ Teknikleri ve Cihazları

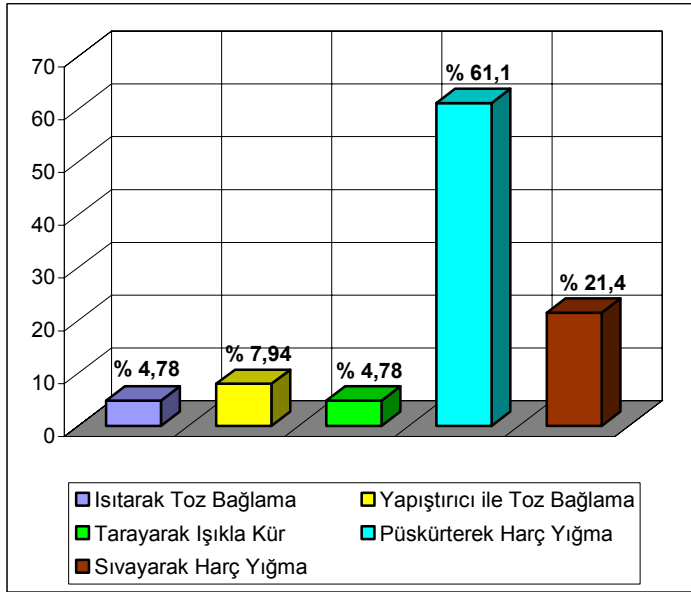
Yukarıda da bahsedildiği gibi yapılan çalışma kapsamında 4 farklı HPÜ teknolojisi deney modelleri üretiminde kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Bu tercih yapılırken hızlı prototipleme tekniklerinin hitap ettiği sektörler ve bu tekniklerin kullanım yaygınlığı göz önünde bulundurulmuştur.(Çizelge 5.1) Ayrıca bu seçim yapılırken geliştirilen modelin sahip olduğu unsurların üretim kriterleri de esas alınmıştır.

Çizelge 5.1’de sıralanan HPÜ inşa yöntemleri dünya çapında endüstriyel prototip üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerden her biri kendisine has özelliklere sahip oldukları için her bir HPÜ yönteminin 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 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 sebeplerden dolayı ülkemiz imalat endüstrisinde 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 5.1. Hızlı prototipleme teknolojilerine sahip cihazların inşa yöntemlerine göre dağılımı [6]

	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 Işıkla Kür	+	8	2	6	4,78
Püskürterek Harç Yığma	-	4	2	77	61,1

Şekilde 5.2’de görüldüğü gibi % 61,1 lik dilimle Püskürterek harç yığma tekniği en fazla orana sahiptir. Ancak bu oranın yüksekliği bu prensibe dayalı çalışan HPÜ cihazlarının çok uzun bir zaman diliminde inşa safhalarını tamamlayabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yöntemin prensiplerine dayalı çalışan hemen hemen çoğu HPÜ cihazı kuyumculuk sektörüne hitap etmektedir. Ülkemiz endüstrisinde HPÜ teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen prototip üretimi; cihaz, hammadde ve yöntemlerin maliyetleri sebebiyle yukarıda görülen tablo sonucunu ortaya çıkarmıştır. Buna göre; ülkemiz imalat endüstrisinde HPÜ teknolojileri bazında ısıtarak toz bağlama tekniği % 4,78 lik, yapıştırıcı ile toz bağlama tekniği % 7,94lük, tarayarak ışıkla kür tekniği % 4,78 lik, sıvayarak harç yığma tekniği % 21,4, püskürterek harç yığma tekniği % 61,1 lik dilimlere sahiptirler.



Şekil 5.2. Türkiye’de yerleşik HPÜ tezgahlarının inşa yöntemlerine göre yüzdelik dağılımı [6]

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 ışıkla kür ve ısıtarak toz bağlama teknikleri, ABS malzemenin ısıtılıp katmanlar halinde inşa prensibini kullanan sıvayarak harç yığma tekniği tercih edilmiştir.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, çalışmanın amacına uygun olarak modelin inşa edileceği HPÜ sistemleri ile ilgili yukarıda verilen teorik ve bilimsel veriler ışığında seçilen model aşağıda belirtilen işlem basamakları esasına göre inşa edilmiştir.

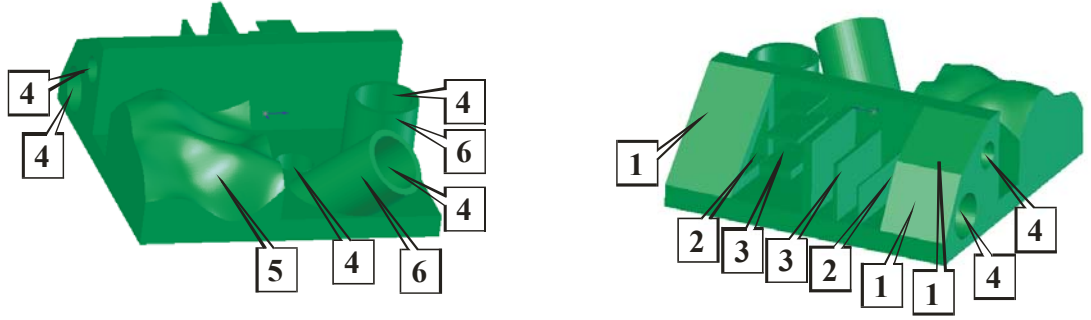
Model inşa süreci basamakları,

1. STL Datası Hazırlığı
 - a. 3B Parça tasarımının STL formata dönüştürülmesi
 - b. STL formatının düzenlenmesi ve iyileştirilmesi
 - c. Destek yapılarının tasarlanması
 - d. İnşa parametrelerinin oluşturulması
 - e. İnşa katmanlarının oluşturulması
2. Parça İnşa Safhası
 - a. Hızlı Prototipleme Cihazı ön hazırlık safhası
 - b. Parça inşa safhası
 - c. Son inşa safhası
3. İnşa Sonrası Yapılan İşlemler
 - a. Destek yapılarının temizlenmesi
 - b. Parçanın temizlenmesi

Sözü edilen modeller farklı HPÜ tekniklerinde yukarıda sıralanan inşa süreci basamakları izlenerek üretilmiş ve daha sonra bu modeller üzerinde çalışmanın amacı kapsamında kararlaştırılan *Üretilebilirlik*, *Ölçü Tamlığı*, *Yüzey Hassasiyeti*, ve *Üretim Zamanı* kriterleri çalışmanın kapsamı dahilinde yer alan ölçüm ve analiz metotları kullanılarak aşağıda sıralanan başlıklar dahilinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

6.1. Üretilebilirlik Kriterleri

Şekil 6.1’de deney amaçlı geliştirilen model üzerindeki unsurlar görülmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 4 farklı HPÜ yöntemi ile inşa edilmiş modeller üzerinde bu unsurların üretilebilirliği ve kalitesi incelenmiştir.



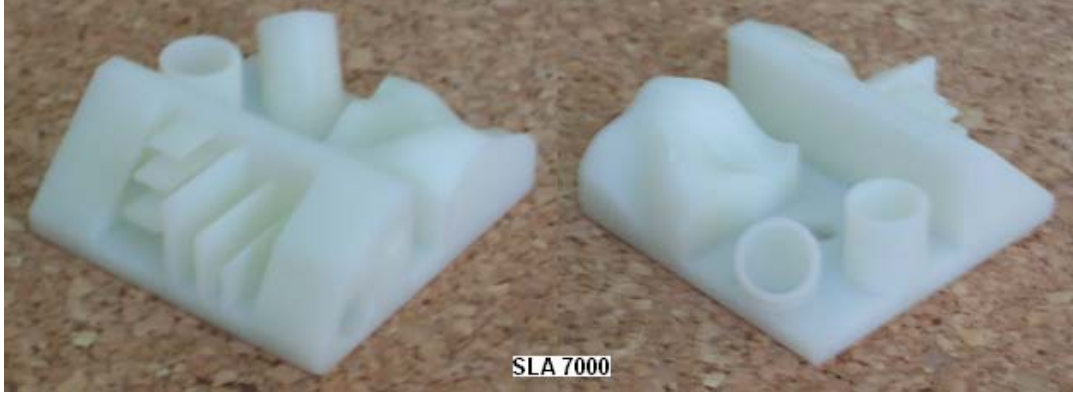
Şekil 6.1. Deney modeli üzerinde üretilebilirlik kriterleri incelenen unsurlar

Çalışmanın kapsam ve yöntemi dahilinde modeller üzerinde yapılan ölçümler sonucu aşağıda sıralanan sonuçlara ve bu sonuçların getirdiği sebeplere ulaşılmıştır;

i) Sıvı olarak Harç Yığılma tekniği dışında bulunan Tarayarak Işıklı Kür, Isıtarak Toz Bağlama ve Yapıştırıcı ile Toz Bağlama yöntemleri ile inşa edilen modellerde bu üç yöntemin, unsurların oluşturulmasında oldukça başarılı olduğu gözlenmiştir. Bu üç yöntem deney için tasarlanmış model üzerindeki tüm unsurları eksiksiz ve hatasız bir şekilde inşa edebilmiştir.

Işıklı kür tekniğinin, katmanlar halinde yayılan sıvı polimerlerin kürlenmesi prensibine bağımlı olarak inşa işlemini gerçekleştirmesinden dolayı, inşa edilen model üzerindeki kompleks yapılar inşa işlemi sonucunda eksiksiz elde edilebilmiştir. Bununla birlikte kullanılan HPÜ cihazının katman kalınlığındaki değerlerin 0,025 mm ye kadar düşürülebilmesi sebebinden dolayı model üzerinde yer alan ince cidarlı yatay unsurlar başarı ile inşa edilebileceği sonucuna varılmıştır. Cihazın tarama aralığındaki değerlerin hassasiyeti sebebinden dolayı ise ince cidarlı dikey unsurların inşasında üretilebilirliğin mümkün olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Cihazın ve yöntemin sahip olduğu katman kalınlığı ve tarama aralığı kriterlerinin oldukça küçük değerlere sahip olması sebebinden dolayı ince cidarlı dikey ve yatay unsurlarla birlikte açılı ve silindirik unsurların inşasında da ışıklı kür tekniğinin başarılı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Model üzerinde bulunan bir diğer kompleks yapı olan freeform yüzeyin orijinal datayla oldukça örtüşen bir sonuç çizmesi de yine kullanılan yöntemin malzeme ve işleyiş özelliklerinden ayrıca da

cihazın sahip olduğu katman kalınlığı ve tarama hızı değeriindeki hassasiyetten kaynaklanmaktadır (Resim 6.1).



Resim 6.1. SLA 7000 HPÜ cihazında üretilen model ve unsurları

Isıtılarak toz bağlama ve yapıştırıcı ile toz bağlama tekniklerinde ise mikro taneli toz yapısına sahip malzemeler ile inşa sürecinin gerçekleştirilmesinden dolayı model üzerinde yer alan tüm unsurlar kolaylıkla inşa edilebilmiştir. İnşa edilen bu modeller üzerindeki unsurların üretilebilirlik kriterlerinin doğruluğu arasındaki küçük değişim ise inşa malzemesi ve destek yapısı olarak kullanılan toz granülleri ve bu toz granüllerinin birbirine bağlanması tekniğinin kriterlerine bağımlı olarak değiştiği sonucuna ulaşılmıştır (Resim 6.2)

ii) Sıvayarak Harç Yığılma HPÜ tekniği ile üretilen model üzerinde bulunan 1 mm den ince cidarlı dikey federlerin ve kesitlerin inşası gerçekleştirilememiştir.

Sıvayarak Harç Yığılma HPÜ tekniğinde sistemin çalışma prensibi açısından geleneksel olarak 1,78 mm çapındaki inşa malzemesini 0,3 mm çapında bir memeden ekstrüzyon ederek inşa işlemini gerçekleştirmesi sebebinden dolayı 1 mm nin altında bulunan dikey cidarların inşasının bu yöntem ile elde edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

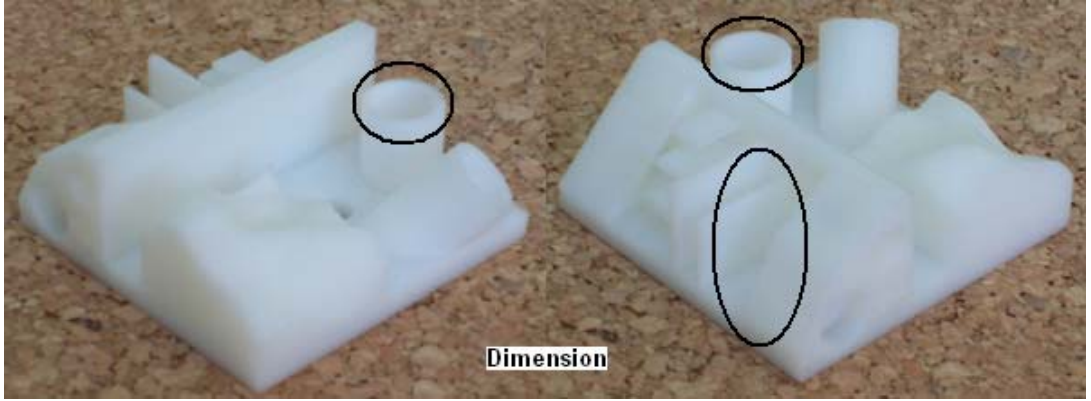
iii) Sıvayarak Harç Yığılma HPÜ tekniği ile üretilen model üzerinde bulunan ince cidarlı dikey federin inşa edilemediği ve ince cidarlı dikey kesitli silindirik unsurun içi boş olarak inşa edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır (Resim 6.3).



Resim 6.2. Z-Corp Z310 ve EOS P380 HPÜ cihazlarında üretilen modeller ve unsurları

Sıvayarak Harç Yığma HPÜ tekniğinde sistemin çalışma prensibi açısından, 1mm kesitin altındaki dikey unsurların cihaz tarafından inşa edilemediği ve inşası gerçekleştirilecek unsurun ilk önce çevresel döngüsünün inşa edilip daha sonra bu çevresel döngünün iç boşluğunun inşasının gerçekleştirilebilmesi sebebinden dolayı eğer bu boşluğun yine 1 mm altında kesite sahip olması halinde inşa edilemeyeceği sonucuna kanaat getirilmiştir. Bu kapsam dahilinde sıvayarak harç yığma HPÜ tekniğinin ince cidarlı dikey unsurların inşa sürecinde yetersiz kaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Resim 6.3).

iv) Model üzerinde bulunan silindirik ve düzlemsel yapıya sahip unsurlardaki açılal yüzeylerin üretilebilirlik kalitesi ve doğruluğu çalışma kapsamında yer alan HPÜ yöntemlerinin tümünde farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Resim 6.3. Dimension HPÜ cihazlarında üretilen modeller ve unsurları

Yukarıda bahsedilen sonuca ulaşılmasındaki sebep çalışma kapsamı dahilinde kullanılan HPÜ yöntemlerinin ve bu yöntemlerin sahip olduğu inşa malzemelerinin yapısal özelliklerinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu sebebin ışığında modeller incelendiğinde ısıtarak toz bağlama tekniği ile üretilen modelin sahip olduğu silindirik ve düzlemsel yapıya sahip unsurlardaki açısallık yüzeylerin üretilebilirlik kalitesi ve doğruluğu en iyi sonucu sergilemiştir. Bunun en büyük sebebi ise bu yöntem dahilinde kullanılan toz granüllerin boyutunun küçük olması ve yöntemin inşa tekniğinde bir noktasal ışınlama ile bahsedilen unsurların oluşturulmasıdır. Bu sebepten yola çıkarak ısıtarak toz bağlama tekniği ile üretilen model dışındaki modellere ait bahsi geçen unsurlar incelendiğinde toz bağlama tekniği ve tarayarak ışınlama kür tekniği sıvayarak harç yığılma tekniğine göre daha olumlu sonuçlar sergilemiştir. Sonuç olarak modeller üzerinde bulunan silindirik ve düzlemsel yapıya sahip unsurlardaki açısallık yüzeylerin üretilebilirlik kalitesi ve doğruluğu, doğrudan inşa malzemesine ve HPÜ cihazının sahip olduğu katman kalınlığı değerine bağlıdır şeklinde ifade edilebilir.

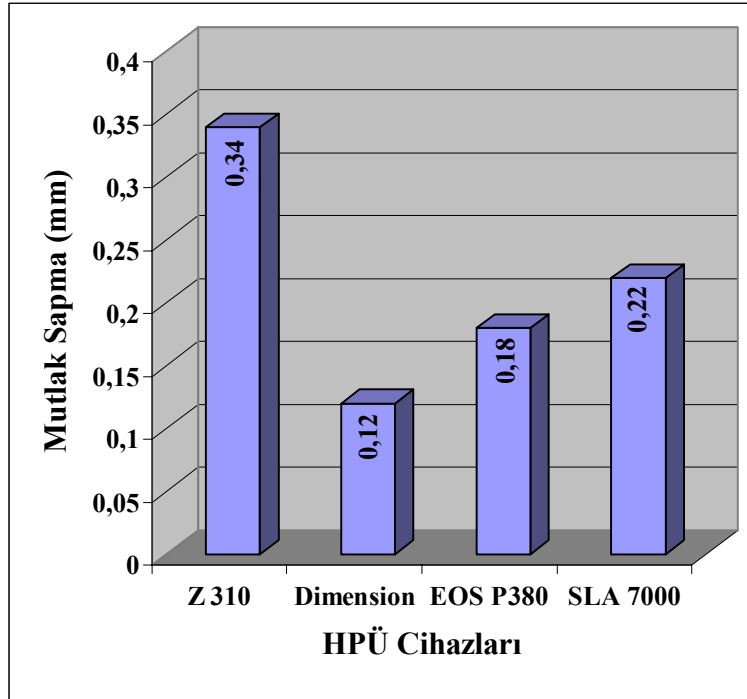
v) Çalışma kapsamında inşası gerçekleştirilen modeller incelendiğinde, inşa malzemesi olarak toz kullanan HPÜ sistemlerinin inşa ettiği modellerin mukavemetinin diğer modellere göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Modellerin inşası sonrası yapılan test ve analizlerde yukarıda bahsedilen sonuca ulaşılmasının en önemli sebebi; prototip inşa prensibi olarak toz granüllerin birleştirilmesi ile inşa edilen modellere dışarıdan gelen kuvvetler karşısında toz

yapının birbirinden ayrılma isteğinin güçlü olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple her iki HPÜ yöntemi inşası sonrası destek yapılarının temizlenmesi esnasında oldukça dikkatli operatör kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır.

6.2. Ölçü Tamlığı

Çalışma kapsamında tercih edilen farklı HPÜ yöntemleri ve cihazları ile inşa edilen modellere ait ölçüm analizleri CMM 3 Boyutlu ölçüm cihazında ve diğer yüksek hassasiyetli ölçüm ekipmanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler aynı laboratuvar şartlarında inşa edilen dört parça üzerinde aynı ölçüm noktaları kullanılarak, ölçü tamlığının sağlanıp sağlanamadığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.2’de ki grafiklerde bir arada görülmektedir.



Şekil 6.2. Mutlak sapma değerleri grafiği

Yapılan ölçümler sonrasında, sıvayarak harç yığma tekniği prensibi ile çalışan Dimension cihazında üretilen modelde $\pm 0,12$ mm mutlak sapma değeri ile en iyi mutlak ölçü tamlığı değeri tespit edilmiştir. Ölçü tamlığı verimi açısından ısıtarak toz bağlama tekniği prensibine göre çalışan EOS P380 cihazında üretilen modelde $\pm 0,18$

mm mutlak sapma değeri, tarayarak ışıkla kür tekniği prensibi ile çalışan SLA 7000 cihazında üretilen modelde $\pm 0,22$ mm mutlak sapma değeri, yapıştırıcı ile toz bağlama prensibine göre çalışan Z310 cihazında üretilen modelde $\pm 0,34$ mm mutlak sapma değeri sonuçlarına ulaşılmıştır.

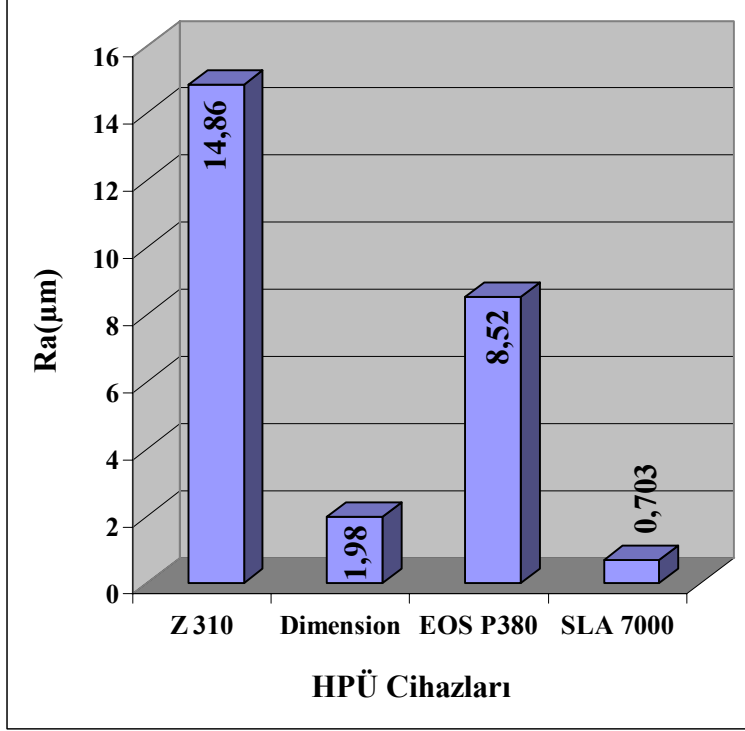
Sonuçta ölçü tamlığı açısından en verimli değeri gösteren Dimension cihazının inşa süreci esnasında öncelikle çevresel döngü inşası daha sonra bu çevresel döngünün boşluğunu inşası yapması dolayısı ile bu sonuca ulaşıldığı kanaatine varılmıştır. Isıtarak toz bağlama ve yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ tekniklerinin ölçü tamlığı değerleri cihazların sahip oldukları katman kalınlığı değerine ve kullanılan toz malzemenin yapısına bağımlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Tarayarak ışıkla kür tekniğinde ise ölçü tamlığı kriterini cihazın sahip olduğu katman kalınlığı ve tarama aralığı kabiliyetlerinin belirlediği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca tarayarak ışıkla kür prensibine göre çalışan sistemlerde kullanılan malzemelerin inşa sonrası gösterdiği malzeme karakteristik özelliklerine bağımlı çekme ve genleşme değerleri bu sonucu ortaya çıkarmıştır.

6.3. Yüzey Kalitesi ve Hassasiyeti

Üretilen parçaların yüzey kalitesi aynı laboratuvar şartlarında farklı prototipler için aynı ölçüm noktaları üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen modeller üzerinde 5,6mm lik ölçüm uzunluğunda 3 farklı referans yüzey seçilerek yüzey pürüzlülüğü değerleri tespit edilmiştir. Bu referans yüzeyler düzlemsel yatay, düzlemsel dikey ve açısal formlu yüzeylerdir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.3, Şekil 6.4, ve Şekil 6.5’de belirtilmiştir.

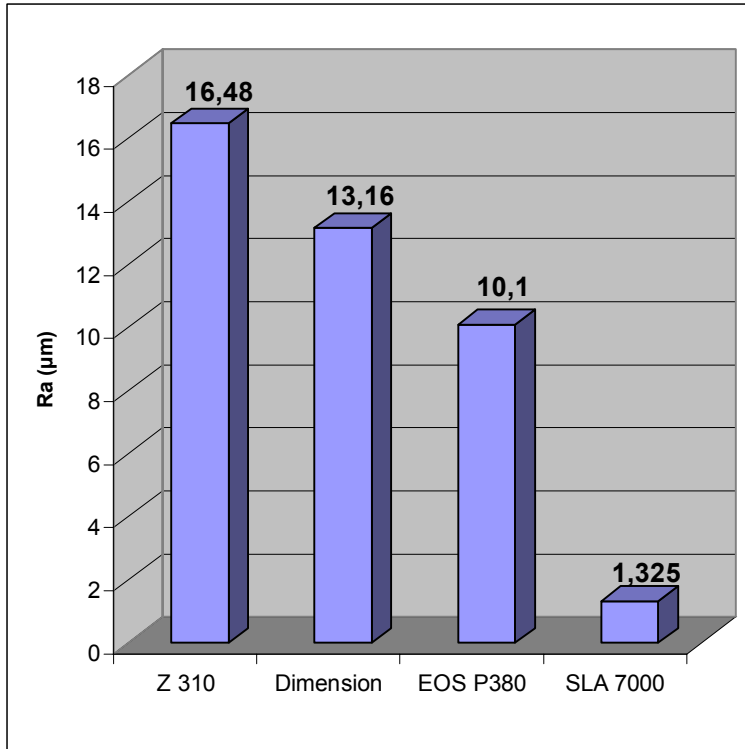
Şekil 6.3, Şekil 6.4, ve Şekil 6.5’de verilen farklı yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerine ait grafikler incelendiğinde, hızlı prototipleme teknikleri ile parça üretiminde yüzey kalitesini etkileyen üç unsur bulunduğu görülmektedir. Bu unsurlar inşa esnasındaki katman kalınlığı, inşa esnasında kullanılan inşa malzemesinin karakteristik özellikleri ve inşa esnasında polimerizasyon işlemi için kullanılan lazerlerin tarama aralığıdır. Katman kalınlığı etkisine örnek olarak “dimension cihazının” üretmiş olduğu model verilebilir. Bu model üzerindeki ölçümlerde, ölçüm

inşa katmanları yönünde yapıldığında pürüzlülük değeri (Ra) 1,98 μ m, inşa katmanlarına dik yönde yapıldığında pürüzlülük değeri (Ra) 19,86 μ m olduğu görülmektedir. Ayrıca katman kalınlığının pürüzlülüğe etkisi açılı yüzeylerde net bir şekilde belirgin olmaktadır.

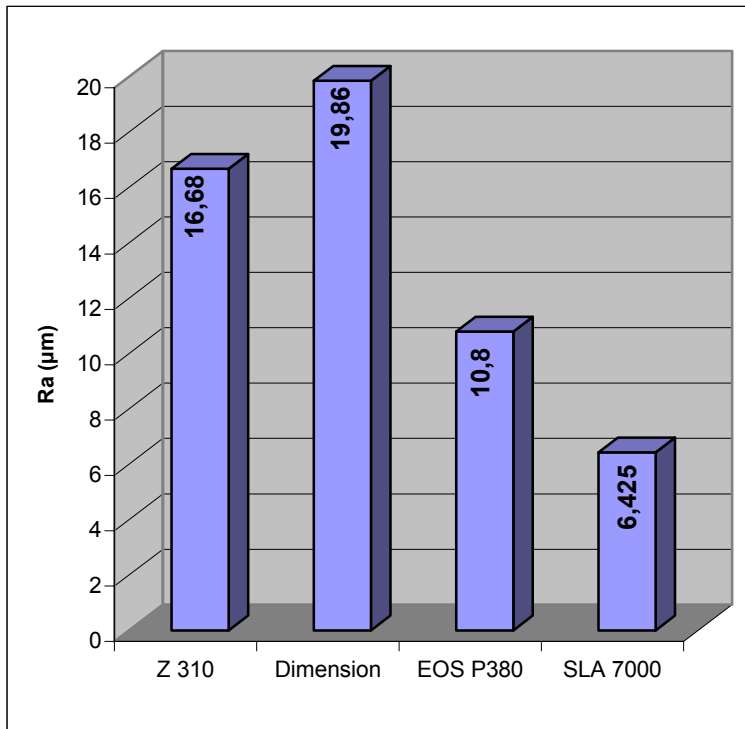


Şekil 6.3. Düzlemsel yatay yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği

İnşa malzemesinin etkilediği pürüzlülük değerine örnek olarak ise Z310 cihazı ile EOS P380 cihazı kullanılarak üretilmiş modeller gösterebilir. Bu iki cihaz inşa malzemesi olarak toz kullanmasına rağmen kullanılan tozun ve birleştirici yöntemin karakteristik özelliklerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değeri farklı sonuçlar vermektedir. Polimerizasyon için kullanılan lazerin tarama aralığına örnek olarak ise SLA7000 ile inşa edilmiş modele ait yüzey pürüzlülük değerleri örnek olarak gösterilebilir. Bu model üzerindeki değerler düzlemsel yatay yüzeylerde ölçüldüğünde pürüzlülük değeri (Ra) 0,703 μ m iken düzlemsel dikey yüzeylerde pürüzlülük değeri (Ra) 1,325 μ m olarak tespit edilmiştir. Bu sonuç lazerin tarama yönünden ve inşa sırasındaki katman kalınlığı değerlerinden dolayı ortaya çıkmıştır.



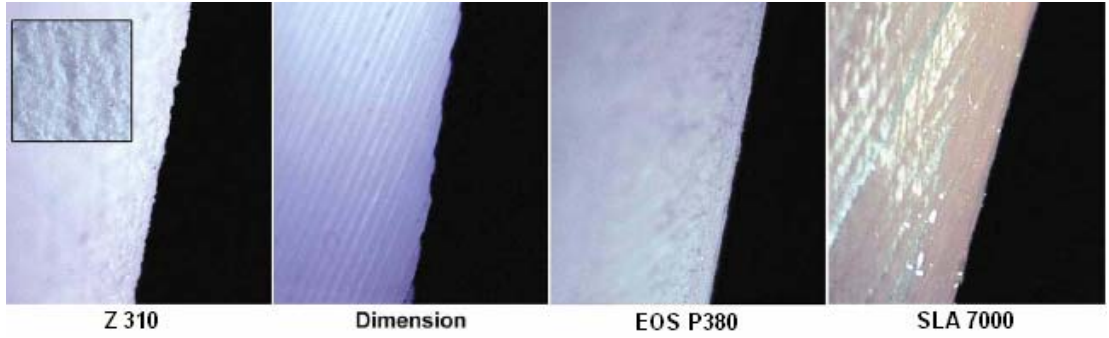
Şekil 6.4. Düzlemsel dikey yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği



Şekil 6.5. Açısal formlu yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri grafiği

Hızlı prototipleme teknikleri ile parça üretiminde yüzey kalitesini etkileyen bir diğer önemli unsur ise destek yapılarının karakteristik özellikleridir. Çünkü destek yapıları inşa bitiminde parça yüzeyinden temizlenmektedir. Bu temizleme esnasında yüzeyde oluşan hasarlar doğrudan yüzeye ait pürüzlülük değerlerini etkilemektedir.

Literatürde yapılan bir çalışmada Z310, Dimension, EOS P380 ve SLA 7000 cihazları ile üretilmiş prototip yüzey kesitlerinin 10X ölçekli görüntüleri Resim 6.4’de verilmiştir. Resim 6.4’de verilen Stereo Mikroskop ile 10x büyütülmüş olan yüzey görüntüleri incelendiğinde, gerçekleştirilen çalışma kapsamında yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak tespit edilmiş olan değerlerin analiz sonuçlarını doğruladığı görülmektedir.



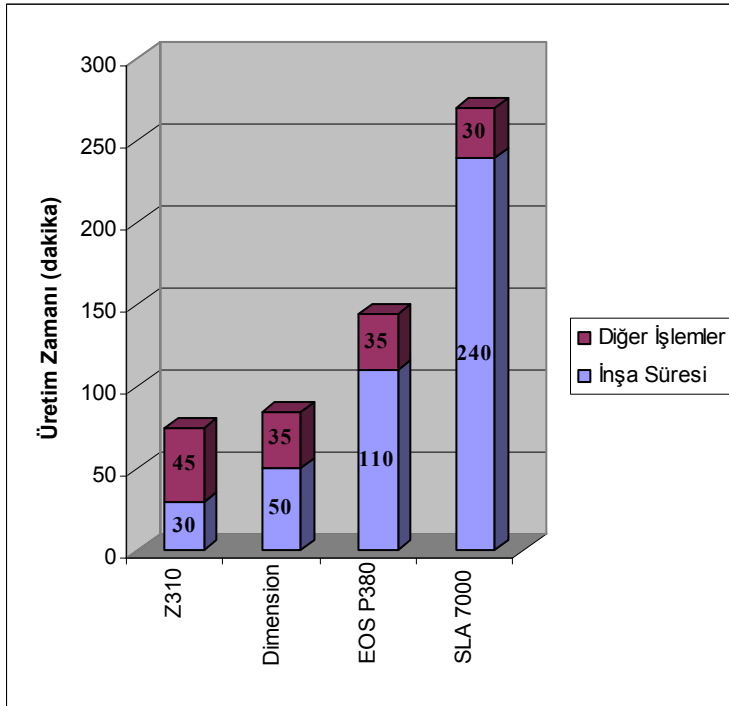
Resim 6.4. Stereo Mikroskop ile 10X büyütülmüş yüzey görüntüleri [37]

6.4. Üretim Zamanı

Çalışma kapsamında üretilen prototiplerin üretim zamanı parça inşa süreci, ön hazırlık ve inşa sonrası yapılan işlemler dikkate alınarak Şekil 6.6’da belirtilmiştir.

Üretim zamanı değerlerine ait grafik incelendiğinde, en uzun işleme süresine SLA 7000 cihazının sahip olduğu görülmektedir. Daha sonra sırasıyla EOSP380, Dimension ve Z310 cihazları gelmektedir. Buradan da anlaşılabileceği gibi farklı HPÜ sistemleri aynı model bile olsa ön hazırlık ve işleme süreleri bakımından farklı durumlar gösterebilmektedir. Bu farklılığın en önemli sebepleri arasında kullanılan HPÜ cihazının tarama hızı, katman kalınlığı, tarama genişliği, inşa hızı gibi teknik özellikleri ile beraber kullanılan HPÜ cihazına ait malzeme özellikleri yer

almaktadır. Kullanılan HPÜ cihazına ait inşa öncesi ön hazırlık safhası, inşa işlemi gerçekleştirilecek modele ait STL datası optimizasyonu ve inşa sonrası oluşan destek yapılarının modelden temizlenmesi işlemi üretim zamanını etkileyen diğer önemli faktörler arasında yer almaktadır. Asıl inşa süresi dışında kalan ve üretim zamanını etkileyen bu faktörler yapılan çalışma kapsamında diğer işlemler başlığı altında toplanmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Üretim zamanı grafiği

Üretim zamanı HPÜ sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında oldukça önemli bir konum teşkil etmektedir. Bu konumun bu kadar öneme sahip olması günümüz endüstrisinin zaman ve maliyet kayıplarının en az seviyede tutulabileceği bir yönetime gereksinim ve ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Bu amaçla teknolojik gelişmeler incelendiğinde, HPÜ sistemlerine ait teknolojik çalışmaların gelebileceği nokta şu anda kullanılmakta olan sistemler çerçevesinde sınırlı kalmaktadır. Ancak bu sistemlerle ilgili kompleks yapılara sahip parçaların daha hızlı ve maliyetsiz olarak başarılı bir şekilde üretilebilmesini sağlayacak teknolojik Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmaları aralıksız olarak hızla gerçekleştirilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kompleks yapıdaki parçaların üretilebilirliğinin hızlı prototipleme tekniği kullanılarak incelenmesi kapsamında üzerinde kompleks yapılar taşıyan bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelin ısıtarak toz bağlama, yapıştırıcı ile toz bağlama, tarayarak ışıkla kür ve sıvayarak harç yığma HPÜ teknolojilerine sahip 4 farklı HPÜ cihazında inşa işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu cihazlarda inşa edilen modeller üretilebilirlik, ölçü tamlığı, yüzey hassasiyeti, yüzey pürüzlülüğü, üretim zamanı kriterleri ışığında laboratuvar şartlarında test ve analiz edilmiştir. Bu test ve analizler sonrası elde edilen bilgiler tartışılmış ve varılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

i) Sıvayarak harç yığma tekniği kullanılarak inşa edilen modellerde 1 mm den az kesit kalınlığına sahip dikey unsurlar inşa edilememektedir. Bunun sıvayarak harç yığma yönteminin, ilk önce unsurun çevresel döngüsü sonrasında bu döngünün iç kısımlarının inşası prensibi ile çalışmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

ii) Isıtarak toz bağlama ve yapıştırıcı ile toz bağlama HPÜ sistemlerindeki gibi inşa malzemesi olarak toz kullanan sistemlerin kompleks yapılara sahip unsurların inşasında başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

iii) Tarayarak ışıkla kür HPÜ yöntemindeki gibi inşa işleminde bir ışık kaynağı ile (lazer) polimerizasyon işlemi gerçekleştiren sistemlerin kompleks yapılara sahip unsurların inşasında başarılı olduğu tespit edilmiştir.

iv) Yatay ve dikey kesite sahip kompleks unsurların HPÜ sistemlerindeki üretilebilirlik kalitesinin ve doğruluğunun, sisteme ait cihazın kabiliyetlerine, inşa işlemi sırasındaki katman kalınlığına, sisteme ait destek yapısı biçimine, inşa işlemi sırasındaki katman aralığına, inşa işleminde kullanılan inşa malzemenin teknik özelliklerine, lazer kullanılan sistemlerdeki lazer tarama aralığına ve yapıştırıcı kullanan sistemlerdeki yapıştırıcının karakteristik özelliklerine bağlı olduğu tesit edilmiştir.

v) Yapısında serbest forma sahip yüzeyler bulunan kompleks unsurların HPÜ sistemlerindeki üretilebilirlik kalitesinin ve doğruluğunun, sisteme ait cihazın ve

yöntemin sahip olduğu inşa sırasındaki katman kalınlığına, katman aralığına ve inşa malzemesinin karakteristik özelliklerine bağımlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

vi) İnşa işlemi gerçekleştirilen modeller incelendiğinde, inşa malzemesi olarak toz kullanan HPÜ sistemlerinden elde edilen parçaların diğer yöntemler ile elde edilen parçalara göre mukavemetinin düşük olduğu tespit edilmiştir.

vii) Sıvayarak harç yığıma tekniği ile üretilen modellerde öncelikle çevresel döngü inşa işleminin gerçekleşmesinden dolayı ölçü tamlığı açısından en verimli sonuca ulaşılabilceği tespit edilmiştir.

viii) İnşa malzemesi olarak toz kullanılan HPÜ sistemlerinde ölçü tamlığı veriminin sistemde kullanılan toz inşa malzemesinin granül yapısına, tozların birbirine bağlanmasında kullanılan ısı kaynağı veya yapıştırıcının karakteristik özelliklerine, sisteme ait cihazın sahip olduğu katman kalınlığı ve aralığına bağımlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

ix) Bir ışık kaynağı tarafından polimerizasyon edilme prensibi ile çalışan sistemlerde ölçü tamlığı verimini, HPÜ cihazının sahip olduğu katman kalınlığı ve ışık kaynağının sahip olduğu tarama aralığı kabiliyetlerinin belirlediği tespit edilmiştir.

x) Çalışma kapsamında test edilen tüm sistemlere ait modeller incelendiğinde ölçü sapma değerlerinin, modellerin inşa işleminde kullanılan inşa malzemesi karakteristik özelliklerine bağımlı olarak gerçekleşen inşa sonrası malzeme çekme ve genişleme değerlerine bağımlı olduğu tespit edilmiştir.

xi) İnşa sonrası elde edilen modellerin yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde bir ışık kaynağı ile polimerizasyon prensibi ile çalışan tarayarak ışıkla kür yöntemi pürüzlülük değerleri açısından konumları birbirinden farklı tüm yüzeylerde en verimli sonucu göstermiştir.

xii) Yüzey pürüzlülük değerleri açısından inşa malzemesi olarak toz kullanan HPÜ yöntemlerinde en verimsiz sonuca ulaşılmıştır.

xiii) HPÜ sistemlerinde üretilen parçalara ait yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin HPÜ cihazlarına ait katman kalınlığı ve aralığı, inşa malzemesinin ve destek yapısının karakteristik özellikleri ve ışıkla kür işleminde kullanılan lazer ışık kaynağının tarama aralığı değerlerine bağımlı olduğu tespit edilmiştir.

xiv) HPÜ sistemlerinde inşa sonrası destek yapılarının temizlenmesi işlemlerinin yüzey pürüzlülük değerlerini etkilediği tespit edilmiştir.

xv) Çalışma sonucunda HPÜ sistemlerinde kullanılan cihazlara ait cihazın tarama hızı, seçilen tarama genişliği ve katman kalınlığı değerleri ve inşa hızı kriterlerinin üretim zamanını etkilediği tespit edilmiştir.

xvi) HPÜ cihazına ait inşa öncesi ön hazırlık safhası, inşa işlemi gerçekleştirilecek modele ait STL datası optimizasyonu ve inşa sonrası oluşan destek yapılarının modelden temizlenmesi işleminin de asıl inşa süresine ek olarak üretim zamanını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

xvii) Üretim zamanı kriterinin HPÜ sisteminin çalışma prensibine, kullandığı inşa metoduna, kullanılan inşa malzemesinin birleştirilmesi prensibine, inşa yönteminde kullanılan destek yapısı çeşidine, yöntemin gerektirdiği ön hazırlık safhalarının özelliklerine ve modelde istenilen ölçü tamlığı ve kalite özelliklerine bağımlı olduğu tespit edilmiştir.

xviii) HPÜ sistemleri ile üretilen modellerin, inşa malzemesi karakteristik özelliklerine bağımlı olarak yüzey kalitesinin ve ölçü tamlığının iyileştirilmesi için ek işlemler yapılabileceği tespit edilmiştir.

xix) Modelin üzerinde taşıdığı kompleks yapıdaki unsurların karakteristik özelliklerine göre tespit edilmiş HPÜ sistemlerinde inşa işlemi gerçekleştirilen modellerin inşa malzemesi özelliklerine bağımlı olarak kolaylıkla silikon kalıplama ve hassas döküm teknolojilerinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

xx) Model dönüşüm tekniklerinde değerlendirilecek olan HPÜ sistemleri ile üretilen modellerin, inşa malzemeleri karakteristik özelliklerinin doğrudan model dönüşüm tekniklerinin uygulanabilirliğini etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

xxi) Model dönüşüm tekniklerinin genel prensipleri incelendiğinde HPÜ teknikleri ile üretilen modellerin bir çoğunun farklı model dönüşüm tekniklerinde uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

xxii) Sonuç olarak, HPÜ teknolojilerinin silikon kalıplama ve hassas döküm gibi model dönüşüm teknolojileri ile desteklenerek istenilen özelliklerde kompleks yapılara sahip parçaların üretiminde kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. 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).
2. 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).
3. Jacobs, P. F., “Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling, Society of Manufacturing Engineers”, ISBN:0-87263-467-1, ***American Society of Mechanical Engineers Pres***, New York, XII-392 (1996).
4. Kruth, J.P., “Materials Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques”, ***Annals of the CIRP***, Paris, 41 (1991).
5. Renap, K., Kruth, J.P., “Recoating Issues in StereoLithography”, ***Rapid Prototyping Journal, MCB University Press***, 1(3):4-16 (1995).
6. İnternet: Neğiş E, İmalatta Mükemmele Doğru; Oto-İnşa Teknolojileri, <http://www.turkcadcam.net/rapor/otoinsa/index.html> (2005).
7. Ippolito, R., Luliano, L., Gatto, A., “Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish”, ***Annals of the CIRP***, Paris, 44 (1995).
8. Jamieson, R., Holmer, B., Ashby A., “How Rapid Prototyping can Assist in the Development of New Orthopadeic products”, ***Rapid Prototyping Journal, MCB University Press***, Edinburgh, 1(4):38-41 (1995).
9. İnternet: Prof. Dr. Kawata, S. “What is Lasie?” ***Laboratory for Scientific Instrumentation and Engineering***, Osaka University, <http://lasie.ap.eng.osaka-u.ac.jp/whatslasie.html> (2001).
10. Bertsch, A. Bernhard, P. Vogt, C. Renaud, P. “Rapid prototyping of small size objects”, ***Rapid Prototyping Journal, MCB University Press***, Edinburgh, 6(4):259-266 (2000).
11. İnternet: “Microstereolithography”, ***Swiss Federal Institute of Technology***, <http://dmstun.epfl.ch/~abertsch/album.html> (2000).
12. Burns M, “Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing”, ISBN 0-13-119462-3, ***Prentice Hall***, Los Angeles, California, 140-369 (1993).

13. Internet: “Advanced Ceramics Research” Arizona, USA
http://www.onr.navy.mil/media/tipoff_display.asp?ID=43 (2003).
14. 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).
15. 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).
16. Hopkinson, N. Dickens P., “Rapid Prototyping for Direcct Manufacture”, ISSN 1355-2546, *Rapid Prototyping Journal, MCB University Press Limited*, Edinburgh, 7(4):197-202 (2001).
17. 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*, Edinburgh, 8(2):76-82 (2002).
18. Stucker, B. Xiuzhi, Q., “A Finish Machining Strategy for Rapid Manufactured Parts and Tools”, ISSN 1355-2546, *Rapid Prototyping Journal, MCB University Press Limited*, Edinburgh, 9(4):194-200 (2003).
19. Bellini, A. Güçeri, S., “Mechanical Characterization of Parts Fabricated using Fused Deposition Modeling”, ISSN 1355-2546 *Rapid Prototyping Journal, MCB University Press Limited*, Edinburgh, 9(4):252-264 (2003).
20. 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*, Edinburgh, 9(5):344-355 (2003).
21. 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).
22. 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).
23. 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).
24. 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).

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., "İleri İmalat Teknolojileri", Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim 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, 14-92 (2000).
28. İnternet: "Hızlı Prototip Üretim Teknolojileri" <http://www3.itu.edu.tr/~yagmur/makale/mak1/mak1.html> (2005).
29. İnternet: "ARPTECH - Rapid Prototyping Specifications" <http://www.arpotech.com.au/specs.htm> (2005).
30. İnternet: "EOSINT Laser-Sintering system solutions" <http://www.eos-gmbh.de> (2005).
31. İnternet: "SLS Systems" <http://www.3dsystems.com/products/sls/index.asp> (2005).
32. İnternet: "DSM Somos" http://www.dsm.com/en_US/html/dsms/home_dsmsomos.htm (2005).
33. İnternet: "3D Printers" <http://www.zcorp.com/products/printersdetail.asp?ID=1#> (2005).
34. İnternet: "Dimension 3D Printers" <http://www.dimensionprinting.com/printers/printing-main.shtml>, (2005).
35. İnternet: "SLA Systems" <http://www.3dsystems.com/products/sla/index.asp> (2005).
36. Yurci, M.E. , Ekşi, M. "Silikon Kalıp İmalatında Hızlı Prototip Teknolojisi Uygulaması" *Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknoloji Anabilim Dalı, MAMTEK*, İstanbul, 890-896 (2001).
37. İnternet: Grimm T, "Rapid Prototyping Benchmark: 3D Printers by Todd Grimm", *TA Grimm & Associates Inc. Edgewood Kentucky USA*, <http://www.tagrimm.com> (2003).
38. EKŞİ, M., "Kalıplı İmalatta Hızlı Prototipleme Tekniği", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, İmal Usulleri Programı*, İstanbul, 6-64 (2001).

39. Schmidt, L.D. “Applications of Stereolithography in Automative Industry”, *Successful Applications of Rapid Prototyping Technologies Conference Society of Manufacturing Engineers*, Dearborn Michigan, 23-29 (1995).
40. Yağmur L., “Hızlı İşleme Teknolojileri (Prototip – Kalıp Geçiş işlemleri)”, *İTÜ Makine Mühendisliği Fakültesi*, İstanbul, 1-6 (1997).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZUĞUR, Burhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.07.1981 Kütahya
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 279 04 56
 e-mail : burhan.ozugur@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / TEF Makine Eğitimi Bölümü	2002
Lise	Kütahya Teknik Lisesi / Makine	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2006	NETDEVRE A.Ş.	Üretim Müdürü
2006-	ODAK BASKILI DEVRE SAN.TİC.LTD.ŞTİ.	İç Anadolu Bölge Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Özüğur, B., “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).

Hobiler

Elektronik, bilgisayar ve imalat teknolojileri, Yüzme, Rock müzik dinleme