

66850

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ☆ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HIZLI PROTOTİP ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Levent YAĞMUR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Haziran 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Haziran 1997

Tez Danışmanı : Y.Doç. Dr. Muzaffer ERTEN 03.07.1997

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Teoman KURTAY 3.7.1997

Prof.Dr. Haluk KARADOĞAN 3.7.1997

HAZİRAN 1997

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yeni bir alan olan “Hızlı Prototip Üretim Teknolojileri (HPÜ)” incelendi. Stereolitografi yönteminde örnek bir parça üretilerek belirli parametrelerin üretim kalitesine etkileri araştırıldı.

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ve HPÜ konusunu bana öneren değerli hocam Y. Doç. Dr. Muzaffer ERTEN’ e , Arçelik A.Ş. HPÜ Laboratuvarı sorumlusu Müh. Selahattin ALGAN’ a bir stereolitografi uygulaması yapılmasına imkan verdiği ve gerekli kaynak kitaplar konusunda yardım etmesi nedeniyle ve Demirdöküm HPÜ Laboratuvarı sorumlusu Müh. Melih BABAGİL’e teşekkürlerimi sunarım.

Yardımları olan herkese teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, daha sonradan bu konuda yapılacak çok daha iyi çalışmalara bir başlangıç olmasını dilerim.

Haziran 1997

Levent YAĞMUR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Ürün Geliştirmede Prototip ihtiyacı	1
1.2 Hızlı Prototip Üretimi (HPÜ-Rapid Prototyping Manufacturing)	3
BÖLÜM 2 HIZLI PROTOTİP ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ	4
2.1 Stereolitografi (SLA-Stereolithography Apparatus)	6
2.1.1 BDT model	7
2.1.2 Dosya dönüşümü	7
2.1.3 Destekler	8
2.1.4 Dilimleme	8
2.1.5 Birleştirme	8
2.1.6 Hazırlama	8
2.1.7 İşleme	9
2.1.7.1 Seviyeleme	9
2.1.7.2 Kritik daire yarıçapı	9
2.1.7.3 Derine dalma	10
2.1.7.4 Yükseltme	10
2.1.7.5 Süpürme	11
2.1.7.6 İşleme pozisyonuna hareket	11
2.1.7.7 Z bekleme	11
2.1.7.8 Lazerle katılaştırma	12
2.1.7.9 Parça tamamlama	13
2.1.7.10 Parça alma ve temizleme	13
2.1.7.11 Son ısıtma (PCA-Postcuring Apparatus)	13

2.1.7.12 Son işlemler	14
2.1.8 SLA sistemlerinde kullanılan fotopolimer malzemeler	14
2.1.8.1 Akrilat esaslı fotopolimerler	14
2.1.8.2 Vinileter esaslı fotopolimerler	14
2.1.8.3 Epoksi esaslı fotopolimerler	15
2.1.9 Lazer tarama hızı	17
2.1.10 HPÜ sistemlerinde kullanılan lazerler	19
2.1.10.1 He-Cd lazerler	20
2.1.10.2 CO ₂ lazerler	21
2.1.11 Diğer Stereolitografi tabanlı ssitemler	21
2.2. Eritilmiş Malzeme Yığma (FDM-Fused Deposition Modelling)	22
2.2.1 FDM sisteminin çalışması	22
2.2.2 Lif malzemeleri	24
2.2.3 İşlem aşamaları	25
2.2.4 FDM 1650 HPÜ sistemi	25
2.2.5 FDM parçaların kalitesi	25
2.2.6 FDM' de hız ve doğruluk	27
2.2.7 FDM teknolojisinin üstünlükleri	27
2.2.8 FDM' nin uygulama örnekleri	28
2.3. Tabakalı Cisim İmalatı (LOM-Laminated Object Manufacturing)	28
2.3.1 Sistemin çalışması	29
2.3.2 İşlem sırası	30
2.3.2.1 Hazırlama	30
2.3.2.2 İşleme	30
2.3.2.3 Son işlem	31
2.3.3 Lazer sistemi	31
2.3.4 X-Y tarama kontrolü	32
2.3.5 Z-ekseni hareketi	32
2.3.6 Tabakalama sistemi	32
2.3.7 Tabakalama kontrolü	32
2.3.8 Malzeme sağlama ve toplama	32
2.3.9 Model destek yapıları	33
2.3.10 LOM malzemeleri	33
2.3.11 Doğruluk ve bitirme	33
2.3.12 LOM uygulamaları	34
2.4. Seçici Lazer Sinterleme (SLS-Selective Laser Sintering)	34
2.4.1 SLS sisteminin çalışması	35
2.4.2 SLS sisteminde kullanılan malzemeler	36
2.5 Katı Tabaka Kurutma (SGC-Solid Ground Curing)	37
2.5.1 Çalışma aşamaları	37
2.5.2 SGC sisteminde kullanılan malzemeler	39
2.5.3 SGC sisteminin diğer yöntemlerle farklılıkları	39
2.5.4 Doğruluk	40
2.5.5 SGC yönteminin üstünlükleri	40
2.6 HPÜ Teknolojilerinin Karşılaştırılması	40
2.7 HPÜ İle Klasik Yöntemlerin Karşılaştırılması	43

BÖLÜM 3 BDT İŞLEMLERİ	44
3.1 Veri İhtiyaçları	44
3.2 Katı Modelleme	46
3.3 3D Yüzey Modelleyicileri	47
3.4 BDT Sisteminde Veri Gösterimi	48
3.5 BDT Parametreleri	48
3.6 Parça Oryantasyonu	49
3.7 Destek Yapıları	50
3.7.1 Köşebentler	52
3.7.2 Projelendirilmiş özel kenarlar	53
3.7.3 Tek ağlar	53
3.7.4 Ağlar	53
3.7.5 Kolonlar	53
BÖLÜM 4 HPÜ SİSTEMLERİNİN YAZILIMLARI	54
4.1 IGES Formatı	54
4.2 STL Formatı	54
4.3 SLA-190, 250, 500 Yazılım Bilgileri	59
4.4 Firmalara Göre Yazılımlar	64
4.4.1 Cubital (SGC)	64
4.4.2 DTM (SLS)	67
4.4.3 Helisys (LOM)	67
4.4.4 Stratasy (FDM)	68
4.4.5 Yazılımları geleceği	69
BÖLÜM 5 KALIP İMALATINDA HPÜ SİSTEMLERİNİN KULLANILMASI	70
5.1 Klasik Kalıp İmalatı	70
5.1.1 Metot 1	70
5.1.2 Metot 2	71
5.2 Daha Uygun Metotlar	72
5.2.1 Döküm prototip	72
5.2.2 Kopya prototip işlemi	73
5.2.3 Frezeleme ve EDM işlemi	74
BÖLÜM 6 HPÜ UYGULAMASI	75
6.1 Dosya	75
6.2 BDT	76
6.3 Z Eksen Seçimi	77
6.4 Üretim Parametreleri	78
6.5 Lazer Işın Kompanzasyonu	78
6.6 Süpürme	79
6.7 Malzeme	79
6.8 Dilimleme	79
6.9 Veri Transferi	80

6.10 Lazer	80
6.11 Destekler	80
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
7.1 İşleme Kalitesi	82
7.1.1 Boyutsal Kalite	82
7.1.2 Geometrik Kalite	82
7.1.3 Yüzey Kalitesi	83
7.2 Tanımlanabilen Parametreler	83
7.3 Fonksiyonel Testlere Uygunluk	84
7.4 İşleme Süreleri	84
7.5 Sonuç Parçanın Ağırlığı	85
7.6 Maliyetler	86
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	89



SEMBOL LİSTESİ

V_s	: Lazer tarama hızı
D_p	: Penetrasyon derinliği
E_{max}, E_c, E_{min}	: Birim alana etkiyen maksimum, kritik ve minimum optik enerji
C_d	: Katılma derinliği
P_L	: Lazer çıkış gücü
W_0	: Lazer ışın yarıçapı
r_{kr}	: Kritik yarıçap değeri
t_r	: Kaplama zamanı
X_{maks}, X_{min}	: Parça uç noktalarının eksen takımına göre X yönünde maks. ve min. değerleri
Y_{maks}, Y_{min}	: Parça uç noktalarının eksen takımına göre Y yönünde maks. ve min. değerleri
Z_{maks}, Z_{min}	: Parça uç noktalarının eksen takımına göre Z yönünde maks. ve min. değerleri
h	: Parçanın Z eksen yüksekliği

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Ürün geliştirmede prototip ihtiyacı	2
Şekil 2.1 Bir SLA sisteminin şematik görünümü	7
Şekil 2.2 Kritik daire örnekleri	10
Şekil 2.3 Tipik bir He-Cd lazer tüpü kesit görünüşü	20
Şekil 2.4 FDM çalışma prensibi	22
Şekil 2.5 FDM kafası ve elemanları	23
Şekil 2.6 Tabakalama işlemi	23
Şekil 2.7 FDM parçalarda oluşan iç hatalar	26
Şekil 2.8 LOM sisteminin şematik görünümü	29
Şekil 2.9 SLS sistemi çalışma elemanları	34
Şekil 2.10 SLS sisteminin çalışması	35
Şekil 2.11 SGC sisteminin şematik görünümü	37
Şekil 2.12 SGC çalışma şeması	38
Şekil 2.13 HPÜ ile klasik yöntemlerin karşılaştırılması	43
Şekil 3.1 Kapalı bir modelde dilimleme örnekleri	45
Şekil 3.2 Yüzey normalleri	46
Şekil 3.3 Üçgenlerle yüzlenmiş bir küp eleman	47
Şekil 3.4 I-DEAS yüzleme metodu	49
Şekil 3.5 Değişik HPÜ sistemleri çalışma hacimleri	50
Şekil 3.6 Katı modelden taranmış temel desteğe geçiş	51

Şekil 3.7 Değişik destekleme türleri	52
Şekil 3.8 Destek yapılarının beş temel bölümü	53
Şekil 4.1 Bir üçgen elemanın köşe noktaları ve doğru normali	55
Şekil 4.2 Bazı yüzeylerin üçgenlerle döşenmesi	56
Şekil 4.3 Döşenmiş katı modeller ve hatalı kısımlar	56
Şekil 4.5 Yanlış yüzleme	58
Şekil 4.6 Doğru ve yanlış dilimler	59
Şekil 4.7 Farklı tabaka kalınlıklarında merdiven adımı etkisi	60
Şekil 4.8 Lazer çizgi kompanzasyonu	60
Şekil 4.9 FDM yazılım gelişimi	68
Şekil 5.1 Klasik kalıp imalatı (Metot 1)	71
Şekil 5.2 Klasik kalıp imalatı (Metot 2)	72
Şekil 5.3 Döküm prototip işlemi	73
Şekil 5.4 Kopya prototip işlemi	74
Şekil 6.1 SLA-250 HPÜ makinası	76
Şekil 6.2 Üretilen parçanın BDT resmi	77
Şekil 6.3 Lazer ışın kompanzasyonu	79
Şekil 6.4 Parçanın desteklerle görünümü	80
Şekil 6.4 Destek formu	81
Şekil 7.1 Merdiven adımı etkisi	83

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Vinileter esaslı bazı fotopolimerlerin özellikleri	15
Tablo 2.2 Sıvı ve katı durumdaki bazı reçinelerin özellikleri	16
Tablo 2.3 SLA’ da kullanılan fotopolimerler ve tipik özellikleri	17
Tablo 2.4 Diğer Stereolitografi tabanlı sistemler	21
Tablo 2.5 Bazı FDM liflerin özellikleri	24
Tablo 2.6 Bazı LOM malzemelerinin özellikleri	33
Tablo 2.7 Bazı SLS malzemelerinin özellikleri	36
Tablo 2.8 Bazı SGC malzemelerinin özellikleri	39
Tablo 2.9 Bazı HPÜ teknolojilerinin yeterlilikleri yönüyle karşılaştırılması	41
Tablo 2.10 Bazı HPÜ teknolojilerinin maliyetler yönüyle karşılaştırılması	42

ÖZET

Bu çalışmada, Hızlı Prototip Üretim Teknolojileri (HPÜT) incelenerek, bir StereoLitografi (SL) uygulaması yapılmıştır. Sistemler, birbirleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınarak, teknoloji seçimi için gerekli bilgilerin açığa çıkması hedeflenmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde, ürün geliştirme aşamasında prototip ihtiyaçları incelenmiştir. Farklı ürün geliştirme aşamalarının tanımlanabilmesi için geometrik, fonksiyonel, teknik prototiplere ihtiyaç vardır.

İkinci bölümde, en yaygın kullanılan beş HPÜT incelenmiştir. Tüm HPÜT, tabakalı imalat yöntemleri olarak bilinmektedir. Prototipler tabaka tabaka imal edilmektedir. Malzeme kullanımları yönüyle; fotopolimer malzeme kullanılan yöntemlerden SL yöntemi ve Solid Ground Curing (SGC) yöntemi ele alınmıştır. Termoplastik malzeme kullanılan yöntemler olarak; Selective Laser Sintering (SLS) ve Fused Deposition Modelling (FDM) sistemleri incelenmiştir. Son olarak ta Laminated Object Manufacturing (LOM) sistemi tanıtılmıştır.

SL yönteminde, sıvı fotopolimer reçine üzerine gönderilen lazer ışını ile malzemenin katılaştırılması sağlanmaktadır. Lazer, parçanın Bilgisayar Destekli Model (BDT) verilerini kullanarak önce kesit sınırlarını daha sonra iç bölgeleri katılaştırır. Parçanın imal edildiği platform üzerinde, platform ile parça arasında destek yapıları oluşturulur. Daha sonra, parçanın ilk tabakasından başlanarak parça bitinceye kadar, tarama aynaları ile istenilen kesit formlarında katılaştırma yapılır. İmalatı tamamlanan parça platformdan alınarak, polimerizasyona uğramamış sıvı bölgelerin katılaştırılması için son ısıtma işlemi tabi tutulur.

SGC yönteminde, önce bir cam levha üzerinde istenilen kesit formunda bir maske oluşturulur. Daha sonra, bir lazer ışığı bu maske üzerinden sıvı fotopolimer reçinenin yüzeyine gönderilerek maskede oluşturulan formda katılaşması sağlanır.

SLS sisteminde, termoplastik malzeme tozları bir lazer yardımıyla eritilip daha sonra sinterlenir.

FDM yönteminde termoplastik malzeme, lif halinde bir ısıtılmış kafaya beslenir. Bu kafa bilgisayar kontrollü olarak istenilen kesit formlarını tabaka tabaka oluşturur.

LOM sisteminde, kağıt türü malzeme ısıya ve basınca duyarlı bir yapıştırıcı ile kaplanmıştır. Bir rulodan beslenen malzeme istenilen formda lazerle kesilerek, ısıtılmış bir silindir yardımıyla bir önceki tabakaya yapıştırılır. İşlem parça bitinceye kadar devam eder.

Üçüncü bölümde, BDT işlemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu işlemler, bir Hızlı Prototip Üretim (HPÜ) sisteminde üretim öncesi işlemleri kapsar. Parçanın katı modellenmiş uygun bir yazılımda yapılarak, HPÜT giriş formatı olan STL formatında kaydedilir.

Ayrıca bu bölümde, parçanın üretimi sırasında ihtiyaç duyulan destek elemanlarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, HPÜ sistemlerinde kullanılan formatlar ve firmalara göre yazılımlar incelenmiştir.

Beşinci bölümde, HPÜ sistemlerinin kalıp imalatında kullanılmaları ele alınmıştır.

Altıncı bölümde, yapılan SL uygulaması ve üretimde kullanılan parametreler verilmiştir.

Sonuç bölümünde, parçanın üretimi sırasında önemli olan noktalar ele alınmıştır. Üretim süresini, parça kalitesini ve maliyetini etkileyen faktörler incelenmiştir.



SUMMARY

RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING (RP&M) TECHNOLOGIES

Recent years ago, a new technology of rapid prototyping entered the market place to create a huge impression on industry, offering the opportunity to greatly reduce the lead times from conception to market of new products. This first generation system, using liquid baths of photopolymer and laser curing techniques, produced models directly from computer-aided design (CAD) files. After a couple of years, as new vendors introduced their products in this field, and customers have gained much experience and understanding of this new technology, a much more serious and demanding approach has been required. This is reflected in the thorough evaluations of the different systems and technologies available today by customers looking for a technology that will best fit their needs.

Rapid Prototyping (RP) is just such a technology but one whose requirement for high integrity 3D product representation has a direct impact on the type of CAD system used. The current level of development of Solid Modelling system gives rise to the opportunity of radically changing the traditional way of designing.

Many companies engaged in production processes have a requirement for a model or prototype component to be manufactured before commencing full scale volume production. Such models can be used for "form fit and function" trials or indeed for secondary manufacturing processes such as casting and moulding.

Model-making is an integral of the design process behind almost any new product, either for "form, fit and function" testing, or "aesthetic visualisation" or as casting molds for actual production. Model-making has been considered a highly-skilled, time-intensive craft, involving considerable expense and weeks of work. And then, if a design flaw is uncovered, a new model often has to be made. There are several application for models.

- *Concept.* Find out how a particular idea translates into a real-world project. Ensure that all members of the team understand the design.
- *Fit.* Test the design dimensions of a part to check that it fits into the intended assembly.
- *Form.* Check how a proposed design looks (aesthetics) and feels (ergonomics). Perform comparison tests on variations of a design using focus groups.
- *Function.* Check that a product or part meets its specifications. Run wind tunnel, use cycle and harsh environment tests. (This application requires that the model be made in the design material).

- *Bid requests.* Help prospective subcontractors understand the design they are bidding on, in order to get faster, more reliable and lower quotes.
- *Marketing presentations.* Let the customer hold the proposed product in his hands, for better understanding of the proposal.

Some secondary process which have been successfully used with patterns made by StereoLithography are :

- Silicon rubber molds,
- Spray metal molds,
- Epoxy tooling, and
- Direct investment casting.

In response, rapid prototyping offers ways to make industrial-quality models and prototypes overnight, directly CAD files, essentially untouched by human hands. Unlike previous CNC technologies that create models by cutting away material from solid models, rapid prototyping systems are based on photo-reactive liquid polymers resins.

In the first chapter, an introduction of the subject has been given. The necessity of prototypes in product development has been described. The designations used for the various forms of prototypes, models and specimen which are required in the course of product development vary considerably at generally valid identification of different product development phases and to classify the various forms of prototypes.

In the second chapter, various systems of Rapid Prototyping have been described. These are StereoLithography (SL), Fused Deposition Method (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Selective Laser Sintering (SLS) and Solid Ground Curing (SGC). All of these are known that layering manufacturing technologies. Parts are built layer by layer. Therefore complex parts are manufacturing easily and quickly in a day. The time of the design process can be decreased by using Rapid Prototyping Technologies.

In 1987 an entirely new application of CAD was developed. Stereolithography was the first commercially available layer-additive process to enable the rapid generation of physical objects directly from a CAD model of the desired object.

In StereoLithography systems (Figure 1) photopolymer resins are used. In the system, a elevator is located at a distance from the surface of the liquid equal to the thickness of first, bottom-most layer. The laser beam will scan the surface following the contours of the slice. The interior of the contour is then hatched by using a hatch pattern (WEAVE, STAR-WEAVE, QuickCast, and ACES). The liquid is a photopolymer that when exposed the ultra-violet (UV) laser beam solidifies or is cured. The elevator is moved downwards, and the subsequent layers are produced analogously. Fortunately, the layers bind to each other. Finally, the part is removed from the vat, and the that is still trapped in the interior is usually cured in a special oven (Postcuring Apparatus-PCA).

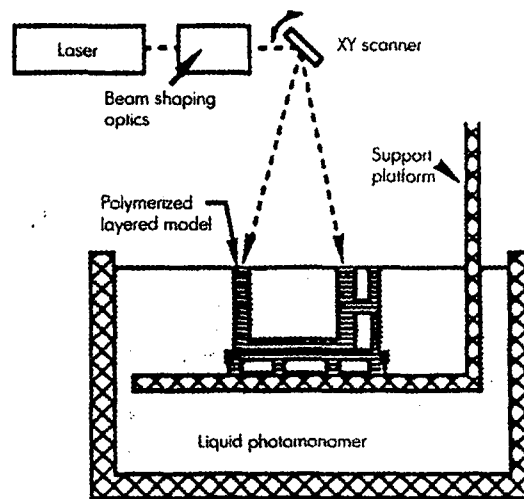


Figure 1

Fused Deposition Modelling uses spools of thermoplastic filament as the basic material for part fabrication. The material is heated just beyond the melting point in a delivery head. The molten thermoplastic is then extruded through a nozzle in the form of a thin ribbon and deposited in computer controlled locations appropriate for the object geometry. The FDM system builds parts in multiple thin layers, as is the case with all current RP&M methods.

LOM process builds objects in thin layers, but as the name implies, LOM parts are fabricated using laminated sheet materials. Consecutive layers are joined using an adhesive that is both temperature and pressure sensitive. The individual cross-sections are cut using a 25- or 50-watt carbon dioxide (CO_2) laser, emitting in the infrared, at a wavelength of 10.6 microns.

SLS technique is based on the selective fusing or sintering of small particles by means of a high power, 50-watt CO_2 laser.

SGC technique involves the use of photopolymer resins but, unlike SL, SGC does not utilize lasers. Rather, each layer is generated through a multi-step procedure. The black toner powder has formed an optical mask. A thin layer of resin is then prepared on a support carriage, which is moved to the exposure station. The glass plate, bearing the mask for that cross-section, is registered above the substrate, and then exposed to flood UV radiation from a high power UV emitting lamp. The liquid photopolymer resin is then selectively cured wherever the mask is transparent.

In the third chapter, CAD processes have been described. RP&M systems are highly dependent on their electronic database input. Simply stated, they are three-dimensional duplicating machines. These systems take an electronic description of a three-dimensional object and reproduce that description into a solid object. The geometric description required for current RP&M equipment are provided by CAD systems. This chapter also involves support structure and its types using in RP&M

The fourth chapter provides the subject of the software architecture utilized in RP&M systems, focusing primarily on StereoLithography. This chapter explains how software is involved in the part building process.

The boundary surfaces of the CAD description are tessellated-formed as a connected array of triangles. The software generates a tessellated object description known as an STL or STereoLithography file. This file basically consist of the X, Y, and Z coordinates of the three vertices of each surface triangle, as well as an index that describes the orientation of the surface normal. The latter feature is necessary to ensure that a clear distinction is made between inner and outer surfaces. Since its inception, the STL format has become the de facto standard of the RP&M field.

The fourth chapter also involves some special formats as using input files in RP&M.

The fifth chapter explains how RP technologies are using in die manufacturing. The example of making master die by conventional methods in industry makes it evident that the process is time consuming, tedious, and expensive. The casting technique is cheap, requiring hours rather than days to produce the electrode for EDM (Electrodischarge Machining). In this technique, RP&M methods use for making prototype of copper electrode which uses EDM.

In the sixth chapter, an application for StereoLithography System (Figure 1) has been described. A pump blade has been built using this technology. In this process a prototype from polymeric material has been produced by photopolymerization, using a material-additive product. There are now available several other material-additive fabrication processes. In the commercialised systems, the prototype is fabricated using a build-by-layer strategy, starting from bottom layer and adding one layer at a time until the top layer is built. Each layer is constructed by writing the layer description either as an outline or by tracing every location where solid material is to exist. In StereoLithography a UV laser is directed over the surfaces of a liquid photopolymer for curing the polymer at each location.

By allowing design and manufacturing engineers to quickly, accurately and efficiently create prototypes, the design process will improve. When an accurate physical model is generated in less than an hour, the designer can economically create multiple iterations prior to final design.

Rapid prototyping gives shape, form and feel to the image on the computer screen by producing 3D models of complex, sculptured-surfaced parts within minutes or a few hours. Rapid prototyping will increase experimentation and allow improvements to be quickly incorporated.

Manufacturers are striving to reduce the lead time from concept to product launch and so the areas of Design, Prototype production, Testing, Tooling manufacture and Manufacturing efficiency are constantly under review.

Rapid Prototyping is therefore very useful in this process, because it is not just a group of new model making techniques but also a new industrial philosophy. In the majority of industry, designers have become used to waiting weeks or months for their designs to be changed into prototypes which can then be checked and tested, manufacturing engineers also wait considerable periods for tooling to be produced before they can start full scale manufacture.

With the advent of Rapid Prototyping designers can now have a prototype in a few days instead of waiting weeks or months. These models are used for checking the aesthetics of a design and to check form and fit. Some functional testing of these models is possible where there are no severe mechanical stresses and where the working temperatures are low. The major limitation with Rapid Prototyping at the moment is the limited number of materials available with the different systems and the generally poor mechanical properties of these. However, more materials are being introduced, and the choice of StereoLithography resins for example has grown so that now we have resins which provide snap fit parts or elastomeric type parts.

This change in expectation of the waiting time is now becoming more widespread amongst manufacturing engineers and so there is a demand to reduce the time from concept design to manufacture down to a few weeks. This has been possible for many years in some areas with the use of 'soft' tooling, using sprayed metal tooling, resin tooling, plaster cast moulds etc. Although 'soft' tooling can produce many thousands of parts using injection moulding, provided the moulds are plated and treated with respect, it is not suitable for more severe processes such as forging.

It is therefore necessary to investigate how Rapid Prototyping can be used to produce hard tooling.

Computers have profoundly affected the way of engineers to perform their function. Their introduction has simplified if not eliminated many of the repetitious tasks of the designer and manufacturing engineer. One of such example is the interface between computers and machine tools that has significantly shortened the manufacturing time of many designs and lead to reduced errors. Surface modelers, and more recently solid modelers provided the impetus for the development of manufacturing processes depending on computers. NC machining and now Rapid Prototyping are manufacturing technologies that emerged from the ability to represent objects in a three dimensional co-ordinate system on a computer. NC machining is a well established procedure which is based on material subtraction techniques under the control of a computer. Rapid Prototyping is a much more recent technology which is based on an additive process, but it is also controlled by a computer.

Since computers are directly linked to machines and control the operations of these machines, an understanding of the way information is stored in the computers and of the needs of the processing equipment are needed to understand the related accuracy issues.

In the early days of Solid Modelling systems all but a few observers were impressed by the notion of representing solid 3D objects within the "mind" of the computer. The

primitive nature of these early systems and the cumbersome way in which they were driven combined with their hunger for resource meant that they were far from ready for use in the production design environment.

Rapid prototyping manufacturers are primarily concerned with making and selling machines. However, direct input from 3D CAD models is needed in order to sell RP as a fully integrated system. This has caused problems because of the proliferation of CAD systems and also the added complication of supporting more than one release of a particular CAD software. A method of mapping a triangular mesh over a surface or solid model (tessellation) was devised which offered the possibility of an easy universal input from CAD to RP. This approach was taken by more than one RP manufacturer. However, limitations soon became apparent. Manufacturers of cylindrical and highly curved objects soon started to request that RP utilise sliced contours which they could produce from their CAD models. In addition, sliced data in the form of copious points in space are produced by the medical industry and by laser and co-ordinate measuring machines (CMM) for reverse engineering. The situation appears to be heading towards multiple choice of input according to user needs. However, there is now the possibility of a new product definition software standard which may help to unify some of the input styles.

The goals of Improved Product Quality in reduced timescales and at reduced cost is being achieved by those companies who are able to assimilate, within a re-structured design process, technologies that give early insight to proposed product designs.

In today's business environment, manufacturers need every competitive advantage to get a quality product to market as quickly as possible. The ability to rapidly produce 3D models of the images created on CAD workstations has become an additional tool to positively impact both quality and speed.

Applications cross a wide spectrum of industries. Any industry that manufactures a tangible product and can benefit from reducing design and manufacturing errors, increasing manufacturing speed or compressing the time to manufacturing has a potential for this technology.

Companies using rapid prototyping are finding the benefits of the technology go beyond the ability to produce more models faster. Once the model has been completed and approved, the prototype may be used in the next step in the manufacturing process.

Prototypes and models are intensively used in the aerospace, automotive, electronics, toy, and consumer products sectors, and are heavily used by foundries. Enterprises that use more than about 200 models a year can probably justify the purchase of their own rapid prototyping system, and many fortune 100 companies have acquired them. Enterprises that use fewer models can still enjoy the advantages of rapid automated prototyping through the use of service bureaus.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

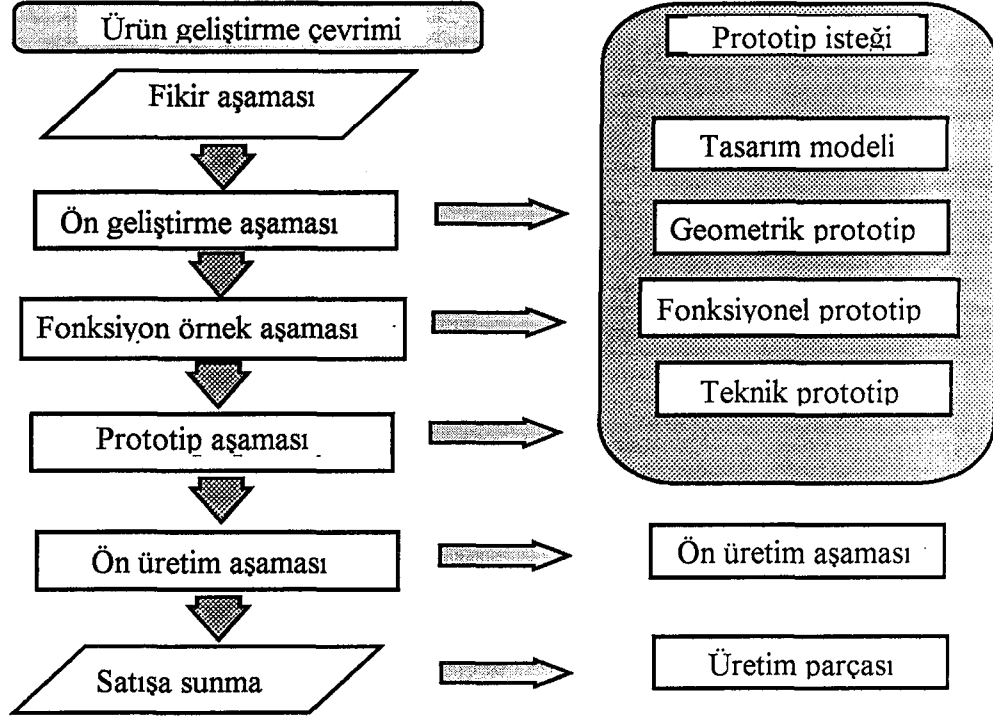
1.1 ÜRÜN GELİŞTİRMEDE PROTOTİP İHTİYACI

Modellere ve prototiplerin değişik formlarına ürün geliştirme aşamasında ihtiyaç duyulur. Çünkü, farklı ürün geliştirme aşamalarının tanımlanabilmesi için değişik şekillerdeki prototipler gerekir.

Ürün geliştirme çevriminin analizi, geliştirme sürecinin tüm aşamalarında prototiplere ihtiyaç duyulduğunu gösterir. Ürün geliştirme çevrimi altı safhaya bölünebilir (Şekil 1.1). Prototiplere, tasarım modeli, geometrik prototip, fonksiyonel prototip, teknik prototip ve üretim öncesi parça şeklinde ihtiyaç duyulur.

Ön tasarım aşamasında, *tasarım modelleri* ve *geometrik prototipler* kullanılır. Bunlar genelde tek parça olarak üretilirler. Tasarım modelleri için yaklaşık bir boyutsal doğruluk istenir. Bu tip modeller yüksek görselliğe sahiptir. Fonksiyonel ihtiyaçlar ikinci derecede önemlidir. Bunlar tipik model malzemelerinden yapılırlar. Modeller tasarım ve satış analiz çalışmalarında kullanışlıdır.

Üretilecek eş parçaların birbirlerine fiziksel olarak uygunluğunun görülmesi, geometrik prototiplerle mümkün olmaktadır. Parçaların geometrik prototipleri montaj edilerek birbirlerine uygunlukları gözlenir. Uygun olmayan eş parçalar için geriye dönülüp, bilgisayar destekli tasarım modelinde gerekli düzeltmeler yapılarak tekrar prototipleri üretilir.



Şekil 1.1 Ürün geliştirmede prototip ihtiyacı

Geometrik prototipler, görsel olmalıdır. Fonksiyonellik ikinci derecede önemlidir. Ölçü ve şekil bakımından doğruluk, biçim ve konum toleransları kadar iyi olmalıdır. Bu tür prototipler, sonradan seri üretimde kullanılan malzeme dışında başka bir malzemede üretilme zorunluluğu yoktur. Genelde model malzemesi kullanılır. Bu prototip türünden üretim planlama alanında kullanılır. Tipik uygulama alanları; ürün geliştirme, imalat için ürünlerin uygunluk kontrolleri ve montaj işlemleri.

Fonksiyonel test aşamasında 2' den 5' e kadar *fonksiyonel prototipler*, işlem ve çalışma prensibin kontrolü ve optimizasyon için kullanılır. Bunlar, planlama sistemleri için üretim planlama alanında, üretim zincirinde, montaj işlem ve ekipmanlarında kullanılırlar. Dış görünüş ve boyutsal toleranslar ikinci derecede önemlidir. Bu tür prototiplerde, mekanik dayanım, elastiklik, sertlik, parçanın kimyasal ve ısı dengesi fonksiyonel test için gereklidir.

Takip eden geliştirme aşamasında, 3 ve 20 arasında (uygulamaya bağlı) *teknik prototipler* kullanılır. Bunlar mümkün olduğu kadar sonuç parçaya uymak

zorundadır. Bazı durumlarda bunlar bazı kullanıcılara gönderilerek, elde edilen sonuçlar tasarımın optimizasyonu için kullanılır.

Ön üretim aşamasında 500 adet ön üretim parça (uygulamaya bağlı) üretilir. Üretim işlemleri bu aşamada başlar. İhtiyaç duyulan işlem parametreleri tanımlanır ve optimize edilir[1].

1.2 HIZLI PROTOTİP ÜRETİMİ (HPÜ-Rapid Prototyping Manufacturing)

Yukarıda tanımlanan prototip türlerine, imalat öncesi bir parçanın geliştirilmesi sırasında sıkça başvurulur. Bu nedenle tasarım aşamasındaki bir parçanın birden fazla modelinin yapılması gerekebilir. Üretilen prototip türüne göre değişik muayene ve testler yapılması gerekir. Örneğin bir fonksiyonel prototip üzerinde yapılan testler ile parçanın alması istenilen formu veya mekanik özellikleri belirlenebilir. Bu amaçla prototip üzerinde karar verilen değişiklikler, parçanın bilgisayar destekli tasarım(BDT-Computer-Aided Design-CAD) modelinde yapılarak tekrar prototipi yapılır.

Yapılan iterasyonlar ile en optimum parça imalatı sağlanmış olur. Böylelikle parça üretildikten sonra çıkması muhtemel kötü durumlar, daha tasarım aşamasında iken çözülmüş olur.

Bir HPÜ sisteminde genel olarak aşağıdaki aşamalar uygulanır.

1. Parçanın BDT modelinin oluşturulması,
2. STL formatına dönüştürülmesi,
3. Parçanın z eksenin belirlenip, destek yapıların oluşturulması,
4. Parça ve desteklerin belirlenen z ekseninde dilimlenmesi,
5. Gerekli işleme parametrelerinin seçimi
6. Prototipin üretilmesi,
7. Prototipin alınıp son işlemlerin yapılması,
8. Gerekli ise çeşitli döküm yöntemleri ile daha iyi mekanik özelliklere sahip prototiplerin üretilmesi[2].

BÖLÜM 2

HIZLI PROTOTİP ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Son on yıllık dilim içerisinde parçaların tabaka tabaka imal edildiği yeni imalat teknolojilerinin ortaya çıkışı imalat zamanını çok kısaltmıştır.

İlk ticari işlem “3D Systems Inc.” adındaki bir şirket tarafından kasım 1987’de sunulmuştur. O sıralarda işlem çok hatalı gerçekleştiriliyor ve malzeme sınırlandırılması yapılıyordu.

Günümüzde artık *Hızlı Prototip Üretim (HPÜ)* teknolojilerinde çok büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Halen otuzun üzerinde HPÜ teknolojisi vardır ve bunların bazıları ticari olup kullanılmakta, bazıları ise araştırma laboratuvarlarında geliştirme aşamasındadır. Başlangıca göre hassasiyet gittikçe artırılmış ve malzeme seçim aralığı genişletilmiştir. Böylece “prototip” kelimesi çok önemli olmaya başlamıştır. Prototipler, gelişen teknolojilerle artık fonksiyonel ve üretim öncesi testler için daha fazla kullanılmaya başlanılmıştır.

Bir parçanın modeli, NC tezgahlarla veya elle işleme gibi klasik metotlarla da gerçekleştirilebilir. HPÜ teknolojisi, diğer klasik yöntemlerde olduğu gibi hammaddeden malzeme kaldırma yerine tabaka tabaka ekleme esasına dayanır. Bu sistemlerle, imalat zamanı kısaltılabilir ve yeni ürünler daha çabuk tasarlanıp imalatına geçilebilir.

HPÜ sistemlerinin ilk örneği *stereolitografi* yöntemidir. Bu sistemde çalışan ve en yaygın olarak bilinen HPÜ teknolojisi de, 3D Systems firmasının *StereoLithography Apparatus (SLA)* sistemidir. Bu firmanın ilk makinası SLA-190 adında çıkarılmıştır.

Daha sonra SLA-250 ve SLA-500 isimlerinde gelişmiş modelleri de üretilmiştir. Kullanılan malzemeler fotopolimer reçinelerdir. HPÜ sistemleri 1991 yılı sonuna kadar %90 oranında SLA teknolojisinin etkisi altında kalmıştır. Başka bir fotopolimer malzeme kullanan sistem ise, Cubital adlı firmanın *Solid Ground Curing (SGC-Katı Tabaka Kurutma)* sistemidir.

Termoplastik malzeme kullanan sistemler için, DTM firmasının *Selective Lazer Sintering (SLS- Seçici Lazer Sinterleme)* ve Stratasys firmasının *Fused Deposition Modelling (FDM-Eritilmiş Malzeme Yığma)* sistemleri sayılabilir. DTM firmasının yaklaşımı (SLS), termoplastik malzeme taneciklerinin yüksek güçlü bir kızılötesi CO₂ lazer kullanılarak eritilmesi ve sinterlenmesi işlemidir. Stratasys yaklaşımı, plastik liflerin erime noktasına yakın sıcaklıklarda ekstrüzyon işlemiyle bir memeden çıkarılıp, bilgisayar kontrollü bir kafa ile istenilen formun verilmesi esasına dayanır.

Helisys firmasının *Laminated Object Manufacturing (LOM-Tabakalı Cisim İmalatı)* yönteminde ise, üzerinde ısı ve basınca duyarlı bir malzeme bulunan kağıt türü malzemeler kullanılır. Bu teknikte, fotoreaktif olmayan malzemeler yüksek güçteki CO₂ lazerle istenilen kesit formunda kesilir.

Tanımlanan tüm işlemlerde giriş BDT modeli olarak alınır ve parametreler işleme bağlı olarak tanımlanır. Üretilcek olan model paralel düzlemler ile *dilimlenir (Slicing)*. Her iki dilim arasındaki uzaklık *tabaka kalınlığı (Layer Thickness)* olarak isimlendirilir.

Fotopolimerlerden dışındaki diğer malzemelerin kullanımı gibi önemli şekilde fark eden etkenler olmasına rağmen, ana işlem aynıdır ve bu; parçaların tabaka tabaka imal edilmesidir. Bu işlemler genel olarak Tabakalı İmalat Teknolojileri (TİT) olarak bilinir. Bu teknolojiler gittikçe gelişmektedir.

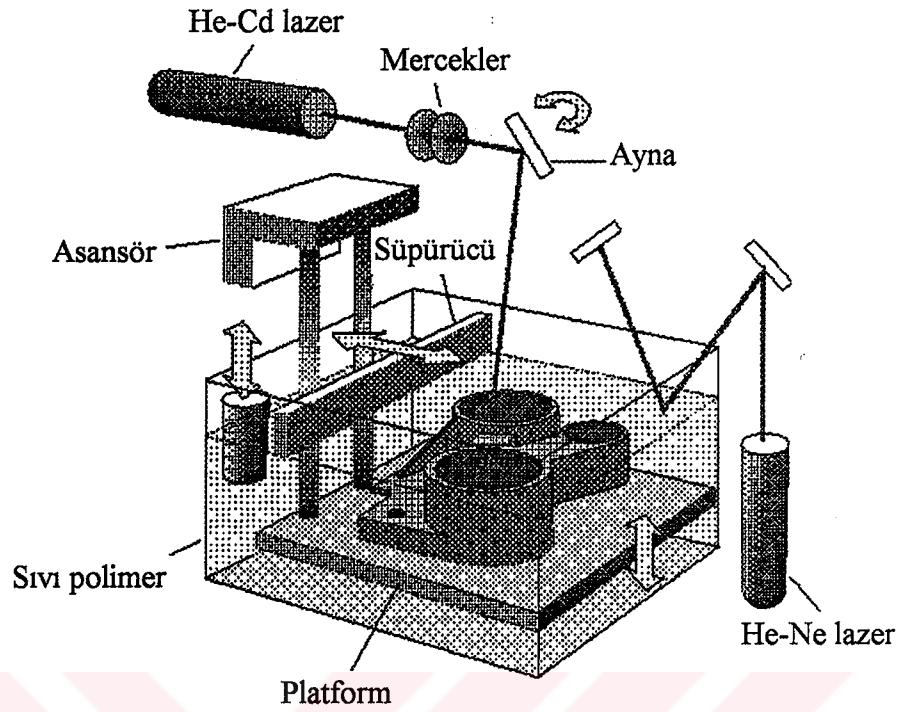
2.1 STEREOLİTOGRAFI (SLA - StereoLithography Apparatus)

Bu sistemde çalışan makine 3D Systems Inc. (ABD) tarafından geliştirilmiş ve piyasa sunulmuştur (Şekil 2.1). Asansör sıvı yüzeyinden alt tabaka kalınlığı kadar bir uzaklıkta yerleştirilmiştir. Lazer demeti dilim çevre çizgilerini takip ederek tarama yapacaktır. Daha sonra da iç kısımlar bu tarama örnekleri kullanılarak taranacaktır. Kullanılan sıvı polimer, morötesi ışığa (Ultraviolet) maruz kaldığında katılaşıp veya kuruyan bir fotopolimer malzemedir. Bir tabakanın katılaştırılması bittikten sonra, asansör dolayısıyla platformun bir tabaka kalınlığı kadar aşağı inmesi suretiyle diğer tabakalar benzer şekilde katılaştırılır. İşlem tamamlandıktan sonra parça sıvı haznesinden alınarak iç kısımlarda sıvı halde kalmış malzemenin de katılaşması için özel bir fırına konur[3].

Sıvıyı katılaştıran Helyum-Kadmiyum (He-Cd) lazeri Şekil 2.1’ de görülmektedir. He-Ne lazeri ise sıvı yüzeyinin doğru pozisyonda olduğundan emin olmak için kullanılır. Süpürücü, düz bir yüzey elde etmeyi garantilemek ve her tabakaya ait işlem zamanını minimum yapmak için yüzey gerilmelerini kırar.

Parçanın sıvı bir ortamda üretilmesi nedeniyle iç kısımlarda kalan sıvı bölgeler *destek elemanlarını* gerektirir. Destek elemanları parçanın daha rijit olmasını sağlar ve belli bölgelerde mukavemetsiz kısımların akmasını engeller. Bu elemanlar sayesinde parça, işlem bittikten sonra zarar görmeden platformdan alınabilecektir. Tarama zamanı dış çevre geometrisine, tarama örneklerine, lazer hızına ve kaplama zamanına (son katılaştırılan tabaka üzerine fotopolimer tabaka kaplama zamanı) bağlıdır.

StereoLitografi sisteminde üretilen prototipler farklı amaçlar için kullanılabilir hale getirilebilirler. Üretilen fotopolimer malzemeye sahip prototipler görsel ve geometrik uygunluk amacı ile kullanılabilirler. Malzemenin kırılma ve ısıdan kötü etkilenmesi dezavantajlarıdır. Fonksiyonel amaçlı kullanımlar için silikon kalıplama yöntemi gibi yöntemler kullanılabilir. Bu işlem vakum altında yapılır ve prototipin oluşturduğu model boşluğuna istenilen özelliklere sahip plastik esaslı malzemenin dökülmesi ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.1 Bir SLA sisteminin şematik görünümü

2.1.1 BDT Model

HPÜ' nde ilk adım üretilecek parçanın üç boyutlu olarak bilgisayarda modellenmesidir. Bu adım için önemli noktalar şöyledir :

- HPÜ' ne ilk başlangıç bir BDT modelidir.
- Tecrübeli bir tasarımcı veya mühendis başarının vazgeçilmez bir parçasıdır.
- Katı modelleme için kullanılan BDT sistemler önemli bir etkindir.

2.1.2 Dosya Dönüşümü

BDT model STL formatına çevrilerek HPÜ sisteminin standardına sokulmuş olur. Bu işlem parçanın sınırlarının ve yüzeylerinin üçgen elemanlar kullanılarak döşenmesi ile gerçekleştirilir.

2.1.3 Destekler

Bu adımda destek elemanları ayrı bir BDT dosyası olarak oluşturulur. BDT tasarımcıları bunu direk olarak veya ayrı bir yazılım kullanarak (örneğin Bridgeworks) yapabilirler.

Desteklerin kullanılma sebepleri aşağıda verilmiştir:

1. Kaplayıcı elemanın parçanın üretildiği platforma çarpmaması için.
2. Platformdaki olası bir çarpılmanın parça işleme sırasında problem çıkarmaması için.
3. Platformdan yükselen parçanın üst kısımlarının parçanın imalatının bitimine kadar desteklenmesi için.
4. Parçanın imalatı bittiğinde platformdan rahat ve zarar vermeden alınabilmesi için.

2.1.4 Dilimleme

Bu işlem ile parça ve destekler verilen tabaka kalınlığında dilimlere ayrılır. Parça, bilgisayar tarafından matematiksel olarak birbirlerine paralel yatay düzlemlerle dilimlenir. Bu adımda tabaka kalınlığı, düşünülen parça üretim şekli, katılaştırma derinliği, arzu edilen tarama aralığı, çizgi genişliği kompenzasyon değeri ve çekme kompenzasyon değeri seçilir.

2.1.5 Birleştirme

Bu işlemle destekler, parça ve aynı platformda üretilen diğer parçaların bilgisayar gösterimleri birleştirilir.

2.1.6 Hazırlama

Bu adımda işleme sırasında kullanılacak parametrelerin kesin değerleri seçilir. Bunlar, sıyırıcı elemanın süpürme sayısı ve periyodu ile istenilen z-beklemesidir. Bu, kaplama işleminden sonra sistemin belirli bir süre bekleme yapmasıdır. Amacı, reçine

yüzeyindeki düzensizliklerin sıvı dinamik gevşemeye uğramasını sağlamaktır. Bu adım sonunda istenilen parametreler seçilir veya daha önceden tanımlanmış değerler alınır.

2.1.7 İşleme

Bu aşamada sıvı fotopolimer malzemenin polimerizasyonu ve parçanın üç boyutlu olarak oluşması başlar.

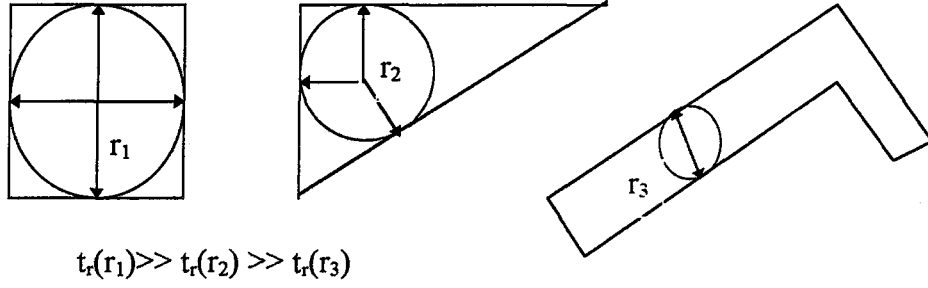
2.1.7.1 Seviyeleme

Eğer reçine polimerizasyon sonucu çekme yapmış ise gerekir. Bu işlem ile reçine seviyesi optimum lazer odağının sağlanması için uygun bir z seviyesine getirilir. Tipik SL reçineleri toplam %(5-9) arasında hacimsel çekmelere maruz kalırlar. SLA' da bir seviyeleme işlemi yapılır. Lazerin her tabakada katılaştırma yapmasından sonra, bir sezgi elemanı yardımıyla reçine seviyesi kontrol edilir. Bu kontrol sırasında seviyenin tolerans sınırları içerisinde kalmadığı tespit edildiğinde, bilgisayar kontrollü hassas bir step motor tarafından bir pompa aktif hale getirilir. Pompanın hareketi ile reçine seviyesi basit sıvı hareketleri ile doğru konuma getirilir. Reçine seviyesi tolerans sınırlarına getirildiğinde işlem tamamlanır.

2.1.7.2 Kritik daire yarıçapı (r_{kr})

Bir parçada kritik daire, reçinenin akabileceği herhangi bir kesitteki maksimum uzaklık olarak tanımlanır. Şekil 2.2' de değişik kesit örnekleri verilmiştir. Daire yarıçapının artması kaplama zamanının (t_r) orantılı olarak artmasına neden olur.

Geometrik olarak bu tür kesitlerin formu, kaplama zamanını etkiler. Kaplama zamanı genel olarak değişik faktörlere bağlı olmakla birlikte, üretilen prototipteki kesit formları da bu parametreyi etkiler.



Şekil 2.2 Kritik daire örnekleri

2.1.7.3 Derine dalma

Bilgisayar kontrollü olarak, z eksenini doğrultusunda platform aşağıya hareket eder. Bu değer SLA-190 için 7.62 mm, SLA-500 için 17.78 mm' dir. Bu işlem geniş düz alanlara sahip parçaların uygun bir şekilde kaplanabilmesi için yapılır. Platform destekleri parça gibi aşağıya indirildiğinde reçine yüzeyinde bir basınç meydana gelir. Viskoz akışkanlar dinamiği ve deney sonuçları ile tanımlanan bu yüzey basıncının telafisi için zaman gereklidir. Bu noktada kritik daire yarıçapı (r_{kr}) tabaka kesiti için reçine viskozitesi ile doğru, basınç derinliğinin karesi ile ters orantılıdır. Bilinen tabaka ve reçine viskozitesi için r_{kr} sabittir.

2.1.7.4 Yükseltme

Önceki adımda oluşan basınç bölgesi yerçekimi etkisi ile reçine ile doldurulur. Z eksenini bilgisayar kontrollü olarak en üst parça yüzeyindeki tabakaya yani serbest reçine yüzeyine yükseltilir. Bu, gelecek adımda istenilen tabaka kalınlığının sağlanabilmesi için fazla reçinenin taşınması işleminde, z bekleme süresinin artmasına engel olabilir. Yükseltme işlemi tamamlandığında, önceki katılaştırılan tabakanın üst yüzeyi sıyırıcı elemanın alt kısmı ile bir tabaka kalınlığı sağlanacak şekilde konumlandırılır.

2.1.7.5 Süpürme

Bu aşamada kaplayıcı eleman reçine kabını önden arkaya doğru geçer. Bu sırada da fazla reçineyi parça yüzeyinden uzaklaştırır. Kaplayıcı eleman hareketini tamamladığında, sistem bir sonraki adıma hazırdır. Bunun değişik yararları aşağıda verilmiştir:

- İzafi hızlı işlem gerçekleşir. Parça geometrisinin büyük bir kısmı için optimum süpürme zamanı 5 sn. dir. Yalnızca hapsolmuş hacimlere sahip parçalar için toplam süpürme zamanı biraz daha artabilir.
- Uygun aynı düzeyde ince tabaka sağlanabilir. Tabaka kalınlığındaki ölçülen değişimler çok küçük değerlerdir.

Dezavantajları ise:

- Hapsolmuş hacimlerin kaplanması sırasında, tabakadaki düzensizliklerin fazlalığı. Sonlu yüzey gerilme etkileri süpürme sırasında, reçinenin bıçağın arka kenarına yapışmasına neden olur. Bu da tabakada düzensizliklerin ve şişkinliklerin oluşmasına neden olur.

2.1.7.6 İşleme pozisyonuna hareket

Süpürme işleminin tamamlanması ile bilgisayar kontrolünde olan z ekseni aşağı hareket eder. Durduğunda kaplanmış reçine tabakasının üst kısmı reçine kabındaki serbest yüzey seviyesinde olur. Bu pozisyonda, önceki tabakanın üst kısmı tabaka kalınlığına eşit büyüklüktedir[4].

2.1.7.7 Z beklemesi

Platform işleme pozisyonuna geldikten sonra, önceki tabaka üzerinde kalan reçine kap içerisindeki reçine ile karıştırılmalıdır. Ama, küçük fakat farklı formdaki kırıksıklıklar, sıvı ara yüzeyi arasındaki katı kısmın etrafında görülebilir. Bu etki SLA penceresinden

çok küçük açılarda, kaplayıcı bıçak kabın arka kısmında bulunduğu sırada, reçine yüzeyi gözlenerek izlenebilir. Ama görüş çizgisi anlaşılamayabilir. Reçine yüzeyinin normal bir düz kenarının sıvıya yansımaları izlenildiğinde, yüzeydeki karışık hareketler gözlenebilir. Devamlı gözlemler, kırıksıklığın çokluğu reçine viskozitesine ve yüzey gerilmesine bağlı olan sonlu gevşeme zamanı sabitliğini bozma eğilimi gösterecektir. Z bekleme aralığı esasen, bu tür düzensizlikleri yok etmek için sıvı yüzeye belli bir süre tanınmasıdır. Küçük düzensizlikler özellikle ince tabakalarda problem yaparlar. Bu nedenle genelde, kalın tabaka kullanılması durumlarında daha büyük z bekleme gerekir.

Derine dalma aralığı 11 sn. sürer. Yükselme adımı da 6 sn. zaman alır. Süpürme periyodu genel olarak 5 sn. (hapsolmuş hacimler söz konusu olmadığında) sürer. Bu aralık süpürme sayısına bağlı olarak 15-20 sn. arasında değişir. Platformun lazer taraması için son pozisyonunu alması da 2 sn. alır. Son olarak, z bekleme aralığı çok değişkendir. Genel olarak bu değer 15-30 sn arasında değişir. 20 sn'lik bir z bekleme zamanı referans alındığında kaplama zamanı her tabaka için yaklaşık 45 sn. sürer.

2.1.7.8 Lazerle katılaştırma

Düz bir fotopolimer reçine yüzeyi elde edildiğinde bu işlem gerçekleştirilmeye başlar. İlk adım, verilmiş tabaka kesiti için parça sınırlarının çizimi işlemidir. Dilimleme işlemi sırasında sınırlarda arzu edilen katılaştırma derinliğini için, bilgisayar otomatik olarak doğru lazer tarama hızını hesaplar. Öncelikle sınırlar çizilir. Bu işlem bir kaç saniye alır. Sistem daha sonra tarama veya tüm alanın katılaşması için doldurma işlemlerini yapar. Lazerle katılaştırma zamanının büyük bir kısmını bu tarama işlemi alır. Tarama prototipin kesin doğruluğunu etkileyen kritik bir aşamadır. Çok küçük aralıklı paralel vektör serileriyle tüm yüzey lazerle çizilir.

Lazer tarama hızı genel olarak, lazer çıkış gücü ve malzemeye bağlı bir takım faktörlere bağlı olarak elde edilebilir.

2.1.7.9 Parça tamamlama

Verilmiş bir tabaka için yukarıda anlatılan lazer işleminin tamamlanması ile önceki adım (z bekleme) parçanın sonradan gelen tabakaları için tekrarlanacaktır. Tecrübeler, SLA ile parça imali yapan kullanıcıların %90 'nın işi tamamladığını, %10 'nun ise değişik sebeplerle (güç problemleri, dosya hataları, kötü çalışma gibi...) üretim çevrimini durdurduğu göstermiştir. Bu, karışık parçaların oluşturulmasında dikkate değer bir başarıdır. Son tabaka da tamamlandığında, bilgisayar z eksenini harekete geçirerek, asansör yardımıyla platformu yükselterek parçayı reçinenin serbest yüzeyine çıkarır.

2.1.7.10 Parça alma ve temizleme

Platform ve üzerinde bulunan bitmiş parça SLA' dan alınır. Bu işlem yapılırken ellerin reçine ile temasını önlemek için özel eldivenler kullanılır. Fazla reçinenin platform ve parçadan temizlenmesi gerekir. Bu kağıt havlular kullanılarak yapılır. Sonunda parça ve platform bir çözücü temizleme kabına yerleştirilir. Bu aşamanın sonunda parça, fazla reçineden temizlenmiş olur. Böylelikle, parça üzerindeki reçinenin temizlenmesiyle gerçek boyutlardan sapmalar engellenmiş olur. Daha sonra parça ve platform düşük basınçlı bir hava ile çok iyi kurutulabilir. Bu şekilde kurutma işlemi hızlandırılmış olur. Bu aşamanın son kısmında parçanın platformdan alınması vardır. Genelde bu işlem, düz formdaki bir kesici yardımıyla desteklerin olduğu kısımdan yapılır. Prototipin kalitesini yükseltmek için bu aşama çok dikkatli uygulanmalıdır.

2.1.7.11 Son ısıtma (PCA-Postcuring Apparatus)

Parçanın iç kısımları kısmen polimerizasyona tabi tutulur. Bu şekilde parça, yeşil görünümünden ön ısıtma ile, daha iyi mekanik özelliklere sahip prototiplere dönüştürülür. Bu işlem geniş bir bantta veya morötesi ışınların etki ettiği bir ortamda yapılır.

2.1.7.12 Son işlemler

İstenilen parçaya göre değişik uygulamalar yapılabilir. Taşıyıcı desteklerin parçadan tamamen uzaklaştırılması gerekir. İsteğe göre kumlama, parlatma, cilalama, boyama veya sprey metal kaplama gibi işlemler yapılabilir. Bu tür işlemler genelde fonksiyonel modeller için gerekebilir.

2.1.8 SLA Sistemlerinde Kullanılan Fotopolimer Malzemeler

SLA ve diğer bazı HPÜ sistemlerinde sıvı fotopolimer reçineler kullanılmaktadır. Sıvı fotopolimerler belirli bir genişlikteki dalga boylarına sahip morötesi ışınlar kullanılarak elektromanyetik radyasyonla katılaştırılırlar.

Fotopolimerler, *epoksi, vinileter ve akrilat* esaslı olmak üzere gruplandırılır. Kimyasal bağlantılar gruplara göre farklıdır.

2.1.8.1 Akrilat esaslı fotopolimerler

İlk fotopolimer türü akrilat esaslı (A) olanlardır. İstenilen özelliklere göre bir çok akrilat esaslı fotopolimer reçineden seçim yapılabilir. Bu tür fotopolimerlerde fotohız yüksektir.

2.1.8.2 Vinileter esaslı fotopolimerler

Vinileter esaslı (VE) fotopolimerler SLA-190 ve SLA-250 sistemlerinde 325 nm dalga boylarında He-Cd lazerleriyle kullanılırlar. Bu türlerin düşük viskoziteli olanları, diğerlerine göre parça üzerinden daha kolay temizlenir. Düşük fotohızlara sahip olmaları dezavantajlarıdır. Fakat bu türde malzemelerin parçada büzülme olayı düşüktür. Bu türe ait bazı özel vinileter esaslı fotopolimerlerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Vinileter esaslı bazı fotopolimerlerin özellikleri

Fotopolimer İsmi	İzafi fotohız ($C_d=0.3$ mm)	Büzülme faktörü (%)	D_p [mm]	Viskozite [cP] (30°C' de)
EXactomer 2201	1.0	<1	0.18	205
EXactomer 2202 SF	2.9	<3	0.17	230

EXactomer 2202 SF adlı fotopolimerin fotohız parametreleri (penetrasyon derinliği, D_p ve birim alana etkiyen kritik optik enerji , E_c) açısından 2201' e göre üç kat daha hızlı olduğu görülmektedir.

2.1.8.3 Epoksi esaslı fotopolimerler

Epoksi esaslı (E) fotopolimerler ilk defa "3D Systems" firması tarafından *Cibatool SL 5170* adıyla Temmuz 1993' de geliştirilmiştir. Bu reçine SLA-190 ve SLA-250 sistemlerinde kullanılmakta ve 325 nm dalga boylarında He-Cd lazerle katılaştırılmaktadır. Mart 1994' de SLA-500 sistemi için yine epoksi esaslı *SL 5180* fotopolimeri geliştirilmiştir. Bu malzeme özellikle 351 nm dalga boylarında, Argon iyon lazer tabanlı sistemlerde kullanılmaktadır[5,6,7].

SL 5170 ve SL 5180 reçinelerden üretilen SL parçalarda efektif lineer çekme düşürülmüş, büzülme değeri azaltılmış ve diğer bazı mekanik iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle daha doğru SL parçalar elde edilebilmektedir.

SL prototiplerinde, epoksi esaslı fotopolimer malzeme kullanımı ile bazı olumlu iyileştirmeler yapılmış olmasına rağmen yine de fonksiyonel testlere uygun prototiplerde olması gereken özellikleri sağlamazlar.

Daha uygun prototipler elde etmek amacıyla ikincil işlemler (hassas döküm, kum kalıba döküm ve silikon kalıplama gibi) kullanılır. Bu şekilde çok daha uygun ve üretilcek gerçek parçanın malzemesine en yakın malzemeden prototipler elde edilmiş olur.

Sıvı ve katı durundaki bazı stereolitografi reçinelerinin 25°C’ deki yoğunlukları Tablo 2.2’ de verilmiştir.

Tablo 2.2 Sıvı ve katı durumdaki bazı reçinelerin özellikleri

Reçineler	SL 5149	SL 5081-1	SL 5170	SL 5180
Türü	Uretan-Akralit	Akralit	Epoksi	Epoksi
Sıvı [gr/cm ³]	1.12	1.14	1.14	1.15
Katı [gr/cm ³]	1.20	1.21	1.22	1.22
Hacimsel çekme (%)	6.1	7.1	7.0	6.1
Efektif lineer çekme (%)	0.7	0.9	0.05	-0.2 ve 0.2 (İşleme türüne bağlı)
Büzülme faktörü (%)	10	10	1-2 (İşleme türüne bağlı)	6-3.5 (İşleme türüne bağlı)

Tablo 2.2 ‘de görüldüğü gibi, epoksi esaslı fotopolimer malzemeler hacimsel çekme, efektif lineer çekme ve büzülme olaylarına göre daha iyi özelliklere sahiptir.

SL reçinelerde görülen % (5-6) hacimsel çekme epoksi esaslı olanlarda da engellenememiştir. Bu değer diğer türlere göre daha düşüktür. Efektif lineer çekme % 1 seviyelerinden daha düşük değerlere çekilmiştir.

Katı sıvı geçişi nedeniyle meydana gelen çekmenin yanında büzülme olayı da fotopolimer reçinelerde ortak bir problemdir. Büzülme faktörü değeri akrilat esaslı olanlarda % 10 seviyelerinde iken epoksi esaslı olanlarda bu değer % (5-6) değerindedir.

SLA sistemlerinde kullanılan fotopolimerler ve tipik özellikleri Tablo 2.3’ de verilmiştir.

Tablo 2.3 SLA' da kullanılan fotopolimerler ve tipik özellikleri

Üretici firma	Ciba-Geigy Cibatoool								Du Pont SOMOS Photopoly.		Allied Signal EXactomer	
İsmi	5081-1	5131	5143	5149	5154	5170	5177	5180	2100 veya 2110	3100 veya 3110	2201	2202 SF
Kimyasal türü	A	A	UA	UA	UA	E	UA	E	A	A	VE	VE
Lazer	He-Cd	Ar ⁺	He-Cd	He-Cd	Ar ⁺	He-Cd	He-Cd	Ar ⁺	Ar ⁺ veya He-Cd	Ar ⁺ veya He-Cd	He-Cd	He-Cd
SLA tipi	250	400 500	250	250	400 500	190 250	250	500	250 400 500	250 400 500	190 250	190 250
<i>Fotoduyarlılık Parametreleri</i>												
D _p (mm)	0.019	0.015	0.015	0.015	0.013	0.012	0.027	0.013	0.022 veya 0.012	0.019 veya 0.013	0.018	0.017
E _c (mJ/cm ²)	6.6	3.9	4.3	5.5	4.2	13.5	11.2	16.2	2.9 veya 3.5	4.0 veya 2.5	27.0	8.5
<i>Sıvı Özellikleri</i>												
Viskozite (cP) 30°C'de	2400	2000	2000	2000	2000	180	2000	187	3800	1000	205	230
Yoğunluk (gr/cm ³) 25°C'de	1.14	1.14	1.11	1.12	1.12	1.14	1.12	1.15	1.16	1.13	1.13	1.13
<i>Katılaş. halde katı özellikleri</i>												
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.21	1.21	1.20	1.20	1.20	1.22	1.20	1.22	1.20	1.21	1.16	
Çekme dayanımı (Mpa)	60	70	35	35	35	60	30	45	7	20	55	65
Elastisite modülü (Mpa)	3045	3560	965	1120	1120	4010	1080	2740	40	480	1480	1410
Kopma uzaması (%)	2.5	2.5	20	10	10	19	12	16	46	9.2	6-12	7
Sertlik (Shore D)	89	89	80	78	78	85	78	84	41	80	80	
Isıl sapma sic. (°C)						49	42	42			46.5	
Özellikleri	Sert, kırılğan, ısıya dirençli	Sert, kırılğan, ısıya direnç	Yüks. Uzama	Genel kullanımlar	Genel kullanımlar	Yüks. doğruluk	Hızlı mod	Yüks. Doğruluk				

2.1.9 Lazer Tarama Hızı (V_s)

Sıvı reçinenin katılaşması, fotopolimer malzemenin yüzeyine odaklanan lazer ışınının hareketi sırasında birim alana etkiyen optik enerjiye bağlıdır.

Fotoduyarlılık, fotohız terimi ile birlikte sık sık kullanılır. Reçinenin fotoduyarlılık parametreleri (D_p ve E_c) malzemeye bağlı değerlerdir. Reçine parametreleri doğrudan

fiziksel yeterlilikle ve serbest sıvı reçine yüzeyindeki belirli lazer ışını tarama hızı (V_s) ile ilişkilidir. Bunlar, istenilen katılaşma derinliğini (C_d) elde edebilmek için gereklidir.

C_d değerleri lazer ile oluşan enerjinin ($E_{\max}$) logaritmik fonksiyonu olarak değişimi çizilirse, lineer bir eğri elde edilir. Bu eğriye *reçine çalışma eğrisi* denilir. Bu, çoğu SL fotopolimer malzemede log-lineer olarak elde edilir.

Çalışma eğrisinin eğimi D_p değerini verir. D_p ve E_c değerleri bir SL reçinesinin aktif bir lazer ışın kaynağına maruz kaldığında, fotoduyarlılığın tanımlanmasında temel parametrelerdir. Bunlar yalnız ele alındığında fotohızı tanımlamazlar. Fakat birlikte ele alındığında, temel çalışma eğrisi eşitliğine göre Beer-Lambert yasası kullanılarak C_d ' yi aşağıda şekilde tanımlarlar (2.1).

$$C_d = D_p \ln (E_{\max}/E_{\min}) \quad (2.1)$$

Tahmini efektif lazer tarama hızı (V_s), özel bir reçine için istenilen katılaştırma derinliğini (C_d) sağlayabilmek için gerekli hız değeridir. Fotopolimer fotohızını tanımlayabilmek için bu parametreleri V_s ' ye çevirmek gerekir. Lazer tarama hızı büyüdüğünde reçinenin fotohızı artar. Lazer tarama hızı Gaussian düşünüldüğünde kolayca hesaplanabilir (2.2). Aslında lazer ışınları tam olarak Gaussian değildir.

$$E_{\max} = (2/\pi)^{1/2} [P_L/W_0 \cdot V_s] \quad (2.2)$$

Burada P_L , fotopolimer etkiyen lazer gücü ve W_0 , Gaussian yarım kalınlık (ışın yarıçapı) değeridir. (2.1) denklemi $E_{\max}$ için çözülürse,

$$E_{\max} = E_c \exp(C_d/D_p) \quad (2.3)$$

ve (2.3) denklemleri birlikte temel stereolitografi hızı eşitliğinde (2.4), reçine parametreleri D_p ve E_c , P_L ve arzu edilen C_d ' nin bir fonksiyonu olarak elde edilir.

$$V_s = (2/\pi)^{1/2} [P_L/W_0 \cdot E_c] \exp(-C_d/D_p) \quad (2.4)$$

Tipik bir lazer çapı : $2W_0 = 0.023$ mm için (2.4) denklemi,

$$V_s = 69.8 [P_L/W_0 \cdot E_c] \exp(-C_d/D_p) \quad (2.5)$$

halini alır.

SLA-250 uygulamasında kullanılan SL-5170 fotopolimer reçine için, $P_L = 30$ mW çıkış gücü (0.15 mm tabaka kalınlığı için) (2.5) denkleminde yerine konulduğunda $V_s = 83$ cm/sn tarama hızı değeri elde edilir.

Efektif işleme taraması sadece lazer gücüne, tabaka kalınlığına ve katılaştırma derinliğine bağlı değildir. Bu değer, parça büyüklüğü ve geometrisinden büyük ölçüde etkilenir.

2.1.10 HPÜ Sistemlerinde Kullanılan Lazerler

Lazerler bazı HPÜ teknolojilerinde katılaştırma veya kesme işlemlerinde kullanılır. Değişik türleri vardır. HPÜ sistemlerinde genel olarak Helyum-Kadmiyum (He-Cd) ve CO₂ lazerleri kullanılmaktadır.

Bir lazerin performans özellikleri, çıkış gücü, dalga boyu, ışın çapı, ışın sapması, mod şekli, optik gürültü, salınım band genişliği, giriş gücü, güvenilirlik ve ömür gibi bir çok faktöre bağlıdır.

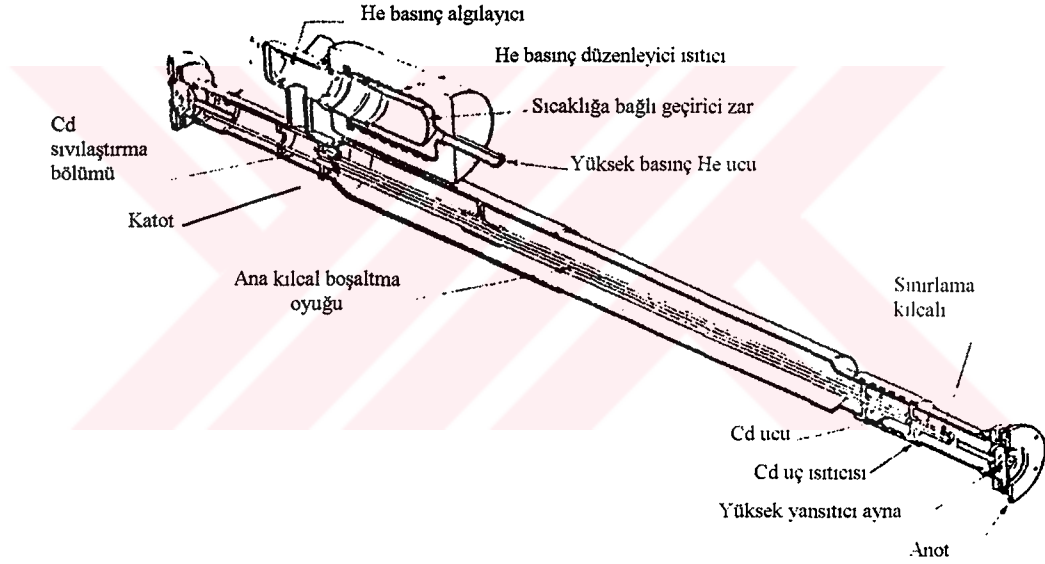
Gaz lazerleri şu an morötesi lazer ışını için öncelikli kaynaklardır. Bir gaz lazer sistemi genel olarak üç parça veya alt sistemden oluşur.

1. Lazer kafası istenilen yayma dalga boylarında optik kazanç sağlaması için, bir *gaz boşaltma tüpü* içerir.

2. İşe yaramaz haldeki kafanın değiştirilmesi için bir *değiştirici* kafa lazer tüpü tarafından oluşturulur.
3. Tutuşturma, çalışma ve lazer tüp içerisindeki gaz ve metal buhar basıncını düzenleme işlemleri için bir *güç kaynağı* içerir.

2.1.10.1 He-Cd lazerler

SLA sistemlerinde fotopolimer malzemenin katılaştırılmasında kullanılır. Sistem pozitif bir He-Cd lazer tüpü (Şekil 2.3) içerir. Kılcallık çapı yaklaşık 2 mm' dir. Sistem, 0.090 A optimum lazer tüp akımında çalışır. Kılcallık uzunluğuna göre giriş gücü 3.5 W/cm' dir. Tüpdeki He basıncı yaklaşık 4 mm-Hg 'dir.



Şekil 2.3 Tipik bir He-Cd lazer tüpü kesit görünüşü

Çıkış gücü ve He-Cd lazerlerin optik gürültüsü, işletme şartlarına, Cd basıncına ve lazer tüp boşaltma akımına duyarlıdır. Boşaltma akımı güç sağlayıcısı tarafından sabit bir değere düzenlenir. He basıncı bağımsız bir geri beslemeli kontrol alt sistemi (lazer tüpte bir basınç algılayıcısı ve kontrol edilebilir He kaynağı içeren) ile düzenlenir. Cd buhar basıncı lazer tüp boşaltma gerilimi kullanılarak düzenlenir.

He-Cd lazerlerinin avantajları; düşük güç harcamaları, uzun ömürleri ve kurma-işletme masraflarının düşük olmasıdır.

2.1.10.2 CO₂ lazerler

Bu lazer türü değişik HPÜ sistemlerinde ve klasik işlemlerde kesme, kaynak ve malzemelerin sinterlenmesinde kullanılır. DTM firması malzeme sinterlenmesinde 25 W'lık bir CO₂ lazer kullanır. Helisys firması levha malzemenin kesilmesinde 50 W'lık bir CO₂ lazer kullanır.

CO₂ lazerler yüksek verime sahiptirler. Yüksek güç yeterlilikleri, düşük kurma ve işletme maliyetleri gibi üstünlükleri vardır. Fakat, fotopolimer reçinelerin katılaştırılması işleminde kullanışlı değildir. Sinterleme ve kesme işlemlerinde verimli çalışırlar.

SLA-500 gibi yeni sistemlerde *argon iyon lazerler* kullanılmaktadır.

2.1.11 Diğer Stereolitografi Tabanlı Sistemler

Stereolitografi yöntemine dayanan tek sistem SLA işlemi değildir. Aşağıdaki tabloda diğer firmaların aynı prensiplere dayanan uygulamaları verilmiştir.

Tablo 2.4. Diğer Stereolitografi tabanlı sistemler

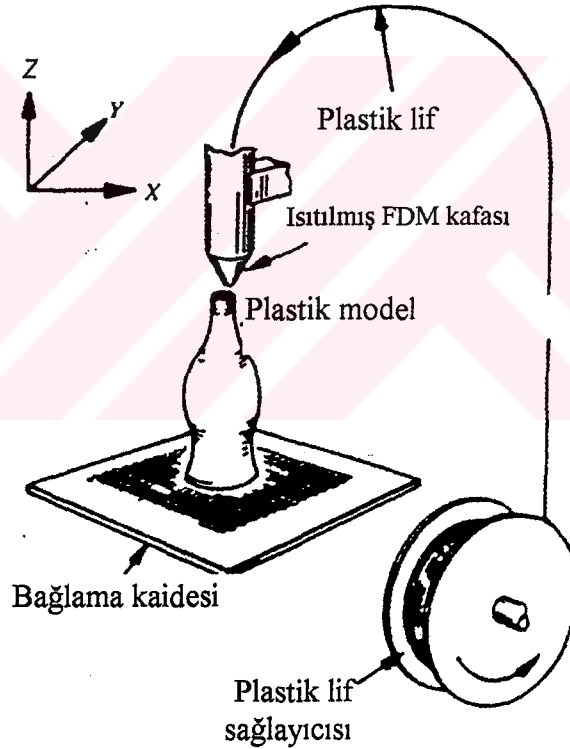
FİRMA	ÜLKE	ÜRÜN
CMET (Mitsubishi)	Japonya	SOUP 600,850
D-MEC (JSR/Sony)	Japonya	SCS 1000HD
Laser 3D	Fransa	SPL 1000, 5000
EOS GmbH	Almanya	STEREOS 400, 600
Teijin Seiki Co.	Japonya	Soliform 300, 500

2.2 ERİTİLMİŞ MALZEME YIĞMA (FDM-Fused Deposition Modelling)

Zehirli olmayan eritilmiş bir malzeme tabakasının ani soğutulup önceki tabaka ile yapıştırılması esasına dayanan bir sistemdir. Bu teknik Scott Crump tarafından bulunmuştur[8].

2.2.1 FDM Sistemin Çalışması

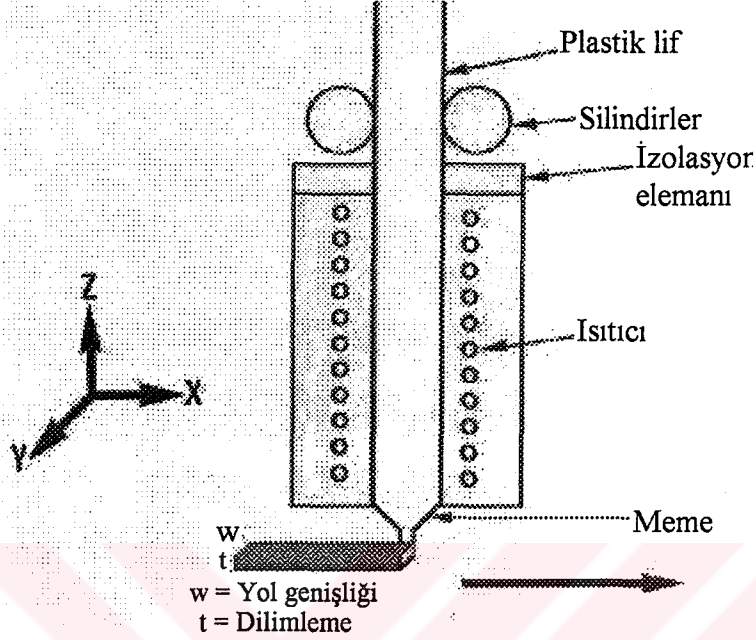
Tabaka malzemesi bir ruloya sarılmış plastik lif halinde ısıtılmış FDM kafasına doğru beslenir. Ekstrüzyon memesi BDT dosyasından parça ile ilgili bilgilere göre tabakaları üst üste oluşturmaya başlar. İşlem parça bitinceye kadar devam eder (Şekil 2.4).



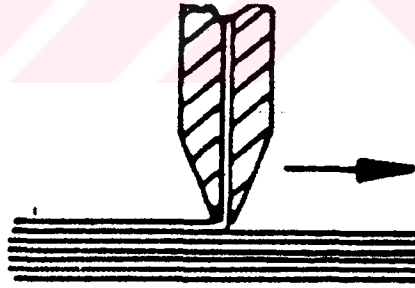
Şekil 2.4 FDM çalışma prensibi

Rulolara sarılı termoplastik malzeme yaklaşık 1.78 mm çapındadır. FDM işleminde termoplastik malzeme katılma noktasının biraz üzerindeki bir sıcaklıktadır. Bu sıcaklık ve ekstrüzyon memesine (Şekil 2.5) malzemenin pompalanması kontrol edilir. Her tabaka bir önceki tabaka ile ısıtılarak yapıştırılır (Şekil 2.6). Plastik liflerin

beslenme hızları monitörden izlenebilmektedir. Herhangi bir verilen zamandaki ekstrüzyon edilmiş malzeme miktarı kontrol edilir.



Şekil 2.5 FDM kafası ve elemanları



Şekil 2.6 Tabakalama işlemi

Her tabakanın kalınlığı malzemenin fiziksel özelliklerine, hareketli kafa hızına, ekstrüzyon basıncına ve meme çıkış çaplarına göre tanımlanır. Tabaka kalınlığı tipik olarak 0.1 mm ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Tabaka kalınlığı hareketli FDM kafasını hızına göre değişmektedir. Yol genişliği (w) (Şekil 2.5.) 0.25 mm ile 6 mm arasında değişmektedir.

2.2.2 Lif Malzemeleri

Malzeme olarak; ABS, hassas döküm mumu ve termoplastik elastomerler gibi zehirsiz modelleme plastik lifleri kullanılır. ABS malzemeden elde edilen prototipler dökümle elde edilmiş parçaya yakın dayanıma sahiptir. Bu nedenle markalama, kumlama ve delme işlemleri yapılabilir.

İşlenebilir mum, mavi ve gri renklindedir. Enjeksiyon kalıplama işleri için kullanılır. Hassas döküm mumu, kırmızı ve akua renklindedir. Direk hassas döküm için model üretiminde kullanılır. Naylon benzeri plastikler beyaz renkte olup boyutsal uygunluk ve fonksiyonel test modellerinde kullanılır. Tablo 2.5' de FDM yönteminde kullanılan lif malzemelerinin bazı özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

Tablo 2.5 Bazı FDM liflerinin özellikleri

Malzeme	Döküm mumu	İşlenebilir mum	Plastic200	Plastic300
Firma	Stratasys	Stratasys	Stratasys	Stratasys
Yoğunluk (gr/cm^3)	0.92	0.92	0.90	1.1
Elastiklik modülü (GPa)			0.62	0.55
Maks.Çekme dayanımı (MPa)			9.1	12.2
Çekme uzaması (%)			4.7	3.5
Darpe direnci (Izod, kJ/m^2)			9	13
Sertlik (Shore D)			58	70
Plastik lif çapı (mm)	1.3	1.3	1.3	1.3
Açıklama/Renk	Kırmızı renkte	Mavi renkte	Poliolefin, beyaz	Polyamid, açık
Fiyat ($\$/\text{cm}^3$) (1993 ABD doları olarak)	0.172	0.172	0.255	

2.2.3 İşlem Aşamaları

- BDT dosyasının IGES tarafsız formatı kullanılarak makineye aktarılır,
- Dosya NURBS tabanlı StrataSlice yazılımına getirilir,
- Burada düzenlemeler yapılabilir veya istenilen yüzey uyumu sağlanır,
- Dosya istenilen tabaka kalınlıklarında dilimlenir,
- Çıkış NC kod (Belirli noktaların koordinatları içeren bir format) olarak alınır,
- 3D Modeler sistemi parçayı oluşturur.

2.2.4 FDM 1650 HPÜ Sistemi

Bu sistemde (254 x 254 x 254) mm boyutlarına kadar parçalar ± 0.127 mm doğrulukla üretilir. QuickSlice programı önceki FDM sistemlerine göre daha gelişmiş bir yazılımdır. Bu programda, STL dosyalar kısa sürede elde edilebilmektedir. Otomatik olarak dilimlenip dosya işlemeye hazır hale getirilir. Program ayrıca, gerekli yerlerin desteklenmesi için SupportWorks adlı modülü de içerir[9].

2.2.5 FDM Parçalarının Kalitesi

Ürün geliştirme aşamasında, bir tasarım prototipinin üretimi zaman alan ve yüksek maliyet getiren bir işlemdir. Bu nedenle son yıllarda ortaya çıkan yeni teknolojilerle BDT dosyalarından hızlıca fonksiyonel prototiplere geçilebilmektedir. Bir fonksiyonel prototip bize, tasarım yanlışlıklarını gösterecek ve tasarımın hızlı bir şekilde tamamlanmasına olanak tanıyacaktır[10].

FDM parçalarda ortaya çıkabilecek hatalar, yüzey ve iç hataları şeklinde incelenebilir.

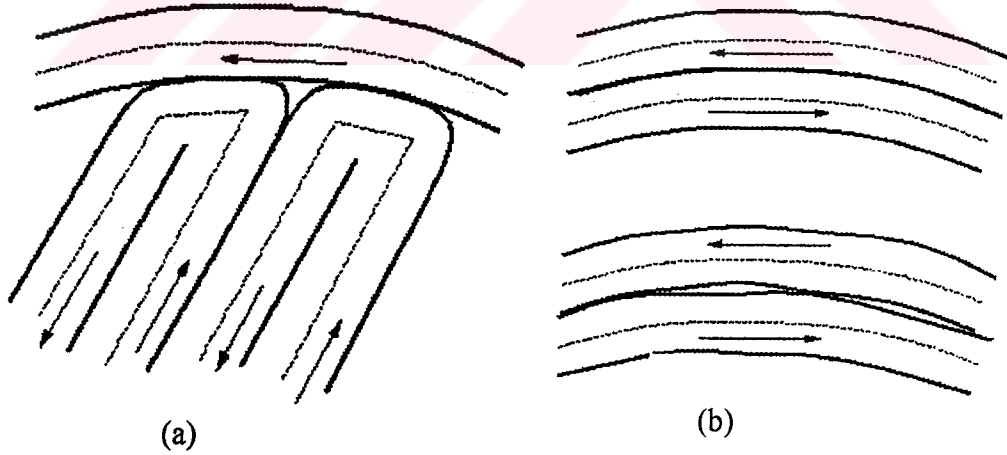
a) Yüzey hataları : Bu grupta merdiven adımı ve giriş etkileri sayılabilir.

- Merdiven adımı etkisi : Bölüm 3' de açıklanmıştır.
- Giriş etkisi : HPÜ metotlarında genel olarak kullanılan STL dosyalarla ilgilidir. STL dosyaları üçgenlerle döşenmiş yüzeyler topluluğudur. Tüm eğri yüzeyler bu

üçgen elemanlarla tam olarak ifade edilmeye çalışılır. Ama hiçbir zaman tam eğriyi tam olarak yakalamak mümkün değildir.

b) İç hatalar : Bu tür hatalar donanım problemleri, yazılım sınırlamaları ve malzeme özellikleri ile ilgili ortaya çıkmaktadır. Çevresel boşluklar (Şekil 2.7a), FDM parçalarının çevresel kısımlarında tamamlanamayan boşluklar sonucu oluşur. Burada FDM kafasının hareket yönü çevreye teğet bir yoldur. Sonuç, boşluk bölümündeki kesişmelerdeki hacimlerin doldurulması için malzemenin yetersiz akışı şeklide gerçekleşir. Bu problemin çözüm metotları, çevreye verilen negatif bir kaydırma ve/veya ilgili noktanın kesişiminde malzeme akış oranını arttırmaktır. İşlem parametrelerinin dikkatlice değiştirilmesi ile bu tür hatalar giderilebilir.

Yol kesişimlerinde oluşan boşluklar ve yol kalınlıkları değişim hataları (Şekil 2.7b), plastik lif besleme mekanizmasında (silindirler) kaydırma ve plastik lif çaplarındaki değişiklikler sebebiyle dengesiz malzeme akışın neden olduğu hatalardır. Plastik lif çapının sıkı kontrolü ve silindirlerin iyi kavraması ile bu tür hatalar minimuma indirilebilir veya giderilebilir. Bu tür hatalar FDM parçalarında çok sık görülmezler.



Şekil 2.7 FDM parçalarda oluşan iç hatalar

2.2.6 FDM' de Hız ve Doğruluk

FDM işlemi yüksek kalitede ABS termoplastik ve hassas döküm mumundan modeller üretir. Parça kalitesi ve çalışma hızı genel olarak aşağıdaki dört alanla ilgilidir[11].

1. Gelişmiş akış kontrol algoritması
2. Gelişmiş plastik lif üretim işlemleri
3. Yüksek XY malzeme yığma hızları
4. Akıllı otomatik takım yolu oluşturan yazılımlar

1 ve 2 nolu maddeler doğruluk ve tamamlama işlemlerini 3 ve 4 ise, parça modelleme hızını iyileştirmektedir.

FDM işleminin en zor yönü, parça doğruluğu veya görünüşten sapma yapmadan, hassas bir şekilde termoplastik malzemenin akışının başlatılabilmesi ve durdurulabilmesidir. FDM 1600/1650 makinalarında takım yolu ± 0.0127 mm sapmalardan daha küçük değerlerde oluşturulabilir. Bu doğruluk, FDM ekstrüzyon kafasının hareketini kontrol eden yazılımın devamlı geliştirilmesi ile elde edilebilir. Bunu QuickSlice yazılımı başarabilmektedir.

2.2.7 FDM Teknolojisinin Üstünlükleri:

- Modellerin kısa zaman dilimlerinde hızlıca yapılabilmesi,
- Doğruluğun sağlanabilmesi, 3D BDT dosyalardan modellerin tekrar elde edilebilmesi,
- Bir ofis ortamında çalışılabilmesi, güvenli olması, zehirli olmayan maddelerin kullanılması. Özel parçalara ve ek tesisatlara ihtiyaç duymaması,
- Son ısıtmanın (Post curing) gerekli olmaması,
- İşlenebilir mum, hassas döküm mumu ve naylon benzeri plastik malzemelerden seçim yapabilme olanağı,
- Düşük işletme maliyeti,

- 3D Modeler sistemi diğer BDT sistemleri arasındaki veri aktarımını destekler. Veriler IGES, NC veya STL formatında girilebilir.

FDM hızlı, tek adımlı işlem, otomatik model yapma imkanı tanıyan bir HPÜ sistemidir. 3D Modeler sistemi imalat zamanını düşürerek tasarım için geçen süreyi azaltır.

2.2.8 FDM' nin Uygulama Örnekleri

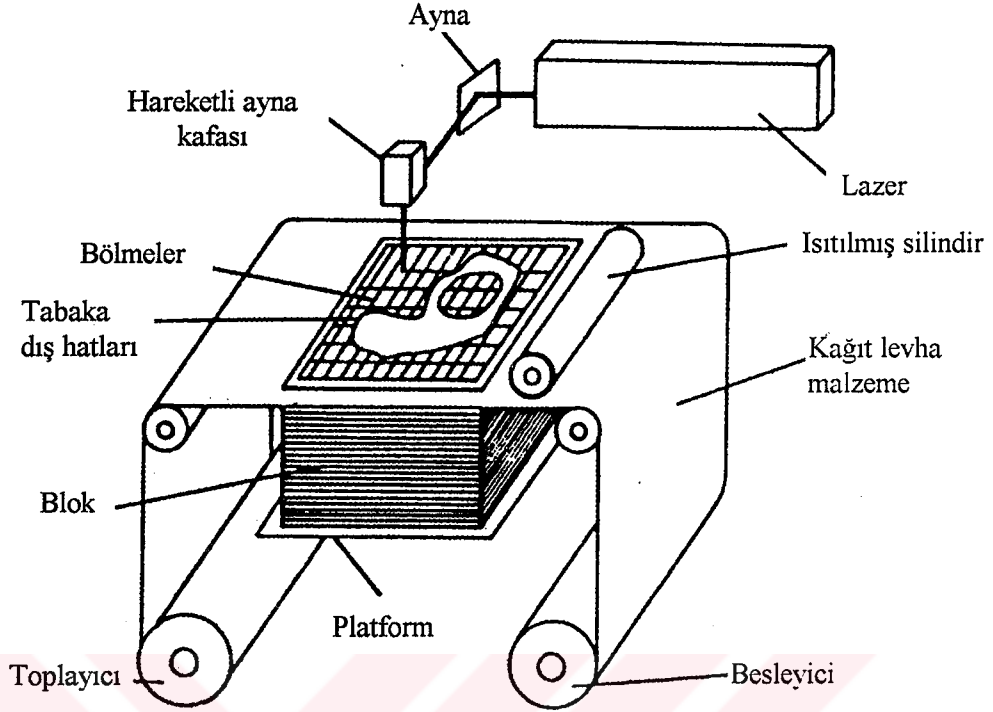
- Üretilcek parça hakkında fikir edinme amaçlı modeller,
- Boyutsal uygunluk ve form, fonksiyonel modeller,
- Satış için görsel modeller,
- Hassas döküm için parçalar,
- Diğer kalıplama uygulamaları için parçalar.

2.3 TABAKALI CİSİM İMALATI (LOM-Laminated Object Manufacturing)

Helisys adlı bir firmanın geliştirip sunduğu bu yöntemde, tabakaları kesme ve bunları yapıştırma prensibi uygulanır.

Yüzeyi altındaki bir yapıştırıcı bulunan tabaka, silindir tarafından basılması ve ısıtılması suretiyle bir önceki tabakaya yapıştırılır. Tabaka takip eden dilim hatlarında bir lazer tarafından kesilir. Parçanın yapılması ile ortaya çıkan fazla malzemelerin taşınması için, sıvı temelli işlemlerin (SLA işlemi) tersi gibi, iç kısımlar taranır. Tabakanın kalınlığı sabit değildir. Bir sezgi elemanı ile gerçek tabaka kalınlığı ölçülür ve model buna göre dilimlenir (Şekil 2.8).

İşleme bölümüne gönderilen kağıt malzeme, CO₂ lazerle istenilen kesit formunda kesildikten sonra fazlalık bölüm, toplayıcı tarafından toplanır. Tabakaların üst üste yapıştırılması ile parça oluşturulur.



Şekil 2.8 LOM sisteminin şematik görünümü

Bir çok şirket üretmek istediği parçanın sunulmasından önce bir modele yada prototipe ihtiyaç duyarlar. Bu gibi model veya prototipler fiziksel uygunluk ve fonksiyonellik bakımından kullanılırlar.

LOM sistemleri, daha doğru ve düşük maliyetli modelleri, klasik metotlara göre daha kısa zamanlarda sunabilmektedir. LOM doğrudan üretilecek parçanın BDT modelinden başka hiçbir yan elemana ihtiyaç duymadan prototipi üretebilme yeteneğine sahiptir. Sistem, girişleri STL formatında kabul etmektedir. Parçalar, dayanım ve minimum üretim zamanı için optimize edilebilir. Sistemin esnekliği, aynı zaman dilimlerinde farklı parçaların üretimine imkan tanır.

2.3.1 Sistemin Çalışması

LOM 1015 makinası 240 Volt elektrik enerjisi ile çalışan ayrıca bir elemana ihtiyaç duymayan bir sistemdir. Bu nedenle makina bir büro veya dükkanda kolayca

işletilebilir. Makine, tabaka malzemesinin sarılı olduğu bir rulodan x-y yönlerinde çalışabilen bir lazer ışını ile kesilmenin yapıldığı işleme pozisyonuna beslenme yapılması ile çalışmaktadır. İşleme bölümünde her tabaka bir önceki ile birleştirilir. Modeller, ısı ile yapışabilen ve CO₂ lazer ışını ile kesilebilen değişik malzemeler kullanılarak üretilebilir. Tipik malzemeler olarak, ısıya duyarlı bir yapıştırıcı kaplı kağıt kullanılır. Polyester film veya diğer tabakalar parçamızın özelliklerine göre seçilir[12].

2.3.2 İşlem Sırası

Malzeme, tabakanın bir önceki tabaka ile yapıştırılması için işleme bölümüne beslenir. Daha sonra ısıtıcı bir silindirin tabakalanmış kısmın üzerinden geçmesi ile sıkıştırma ve ısıtma işlemleri birlikte yapılmış olur. İşlemi tamamlandıktan sonra, ısıtıcı silindir durma pozisyonuna geri çekilir. Sonra, CO₂ lazer ışını yapıştırılmış tabakayı BDT sisteminde oluşturulmuş kesitteki iç ve dış profilleri verecek şekilde kesme işlemini gerçekleştirir. Kesmenin tamamlanması ile z ekseninde tabla, yavaşça aşağıya iner. Malzeme ileri doğru beslenir ve z ekseninde tabla işleme konumuna gelir. İşlem, tüm bu aşamaların parça bitimine kadar tekrar etmesiyle tamamlanır.

2.3.2.1 Hazırlama

LOMSlice yazılımı BDT dosyasını STL formatına çevirir, giriş verisi ve ikincil veri yapılarını otomatik olarak oluşturur. LOM sistemi yazılımı, makineyi ve dilimleme işlemini kontrol eder.

LOMSlice, Windows NT işletim sisteminde çalışır ve dosyaları STL olarak (ikili kod (Binary) veya ASCII) alır.

2.3.2.2 İşleme

İşleme aşamasında, yapıştırıcı kaplama malzemesi ince tabakalar şeklinde istenilen kesit formunda kesilerek birbirlerine yapıştırılır. İşleme çevrimi aşağıdaki adımları içerir.

1. LOMSlice yazılımı 3D modelin bir kesitini, yüksekliğini ve yatay düzlemde dilimleme işlemlerini gerçekleştirir. Yazılım kesiti görüntüler ve malzeme etrafını bir destek yapısına çevirir.
2. Bilgisayar, kesitteki dış hatları ve daha sonra da iç kısımları tarama kesmesi yapabilmesi için lazer ışınını odaklama bilgilerini içerir. Lazer ışın gücü bir tabaka kalınlığında bir kesme derinliği meydana getirecek şekilde oluşturulur.
3. Platform işlenmiş tabakalar ile alçalarak yeni tabaka malzemenin alınması pozisyonuna gelir. Platformun yükselmesi ile ısıtılmış silindir tabaka üzerinden geçerek, basınç ve sıcaklık yardımıyla tabakanın bir öncekine yapışmasını sağlar.
4. Düşey kodlayıcı, tabaka yığınının yüksekliğini ölçer ve bu bilgiyi LOMSlice yazılımına iletir. Daha sonra tabaka, modelin kesitteki formuna getirilmesi için hesaplanır. Bu çevrim parça bitinceye kadar devam eder. Parça bittiğinde dikdörtgen bir blok içerisinde alınır[13].

2.3.2.3 Son işlem

Bu aşamada parçadaki destek malzemesi temizlenip parçanın son işlemleri yapılır. İşlem aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

1. Metal platform ve yeni üretilmiş parça LOM makinasından alınır.
2. Bir bıçak yardımıyla parça içerisinde bulunduğu bloktan alınır.
3. Parçanın belirli kısımlarında kalan malzeme ağaç işleme aletleri ile temizlenir.

Parça bitirildikten sonra klasik işlemler, kumlama, parlatma ve boyama işlemleri LOM parça üzerinde uygulanabilir. Parçanın nem almaması için üretilen, epoksi veya silikon ile kaplanır. LOM parçalarında delme, frezeleme veya tornalama işlemleri uygulanabilir.

2.3.3 Lazer Sistemi

LOM sistemlerinde tabakaları kesmek için CO₂ lazer kullanılır. LOM-1015 25 W ve LOM-2030 50 W güçte lazer kullanılmaktadır. Lazer ışınını tabaka yönlendiren optik

sistem, ışını yansıtmak için üç aynaya sahiptir. Bir mercek ışını tabakanın üst kısmına odaklar. Lazer ışın çapı yaklaşık 0.25 mm' dir.

2.3.4 X-Y Tarama Sistemi

Optikleri içeren yönlendirme tablası, LOM-1015' de 38 cm/sn ve LOM-2030' da 61cm/sn maksimum hızlarda çalışır. Doğruluk 0.025 mm' dir.

2.3.5 Z-Eksen Hareketi

Platform bir step motor ile z ekseninde hareket ettirilir. Doğruluk 0.025 mm' dir.

2.3.6 Tabakalama Sistemi

Tabakalama ısı ve basıncı birlikte uygulayan ısıtılmış bir silindir tarafından gerçekleştirilir. Bu silindirin uyguladığı basınç değerinin arttırılmasıyla tabakalama iyileştirilebilir. Basınç değeri, ısıtılmış silindirdeki bir sınırlayıcı anahtar ile kontrol edilir.

2.3.7 Tabakalama Kontrolü

Bu yapıştırma ve kesme tekniği ile herhangi bir formdaki ve karmaşıklığındaki bir parça prototipi, istenilen hassasiyet derecesine göre, ince tabakalar kullanılarak yapılabilir. Kesme hızı kesitin çevresel büyüklüğüne bağlıdır. Bu nedenle kalın duvarlı parçalar ince duvarlı olanların üretimi kadar hızlı gerçekleştirilebilir. Parçaya yerleştirilen her tabakadan sonra onun nominal kalınlığı hesaplanır. Bu, tabakalar arasında kalınlık farkının olup olmadığının anlaşılması için yapılır.

2.3.8 Malzeme Sağlama ve Toplama Sistemi

Bu işlem iki rulo tarafından yapılır. Toplama işlemini yapan rulo step motor ile, sağlayıcı rulo ise bir AC motor tarafından tahrik edilir.

2.3.9 Model Destek Yapıları

Kesme işlemi sırasında, kesme alanı içerisinde bulunan ve parçanın son şeklinde istenmeyen arta kalan malzeme bulunur. Bu malzeme, modelin bitirilmesi ile kolayca alınabilmesi için lazer ışını ile küp elemanlara dilimlenirler. Küpler işleme sırasında tamamen kuşatılmış boşluklara maruz bırakmak için alınır fakat normal olarak destek sağlamak ve işlem sırasında modelin dengesi için kalır. Bu teknik, silindirin yalnızca bir tam tabakayı tamamen geçmesi ve zayıf bölümlerin kesme işlemi sırasında uygun bir şekilde desteklenmesi içindir. Küplerin büyüklüğü istenilen ayrıntı bilgilere göre değişik olabilir. Modelin bitimiyle küçük küpler dağıtılır.

2.3.10 LOM Malzemeleri

En genel kullanılanı, polietilen esaslı Kraft kağıdıdır. Tablo 2.6' da LOM sistemlerinde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

Tablo 2.6 Bazı LOM malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Firma	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastiklik modülü (GPa)	Maks.Çekme dayanımı (MPa)	Darpe direnci (Izod, kJ/m ²)	Fiyat (\$/cm ³) (1993 ABD doları olarak)
Kağıt	Helisys	0.83	0.39	34	D:104	0.004
Polyester	Helisys				D:82	0.028

2.3.11 Doğruluk ve Bitirme

Genel olarak ± 0.13 mm bir doğruluk elde edilebilir. Model tamamlandığında dayanım ve işlenebilirlik açısından kontrplak ile benzer özellikleri gösterir. Modeller katı malzeme tabakalarından yapıldığı için sıvıdan katıya geçişte çekme olayına sebep olan faz değişiklikleri yoktur. Böylece belirli bir doğruluk seviyesi yakalanabilir. Sistemin sadeliği nedeniyle düşük maliyetler ve bakım masrafları söz konusudur.

2.3.12 LOM Uygulamaları

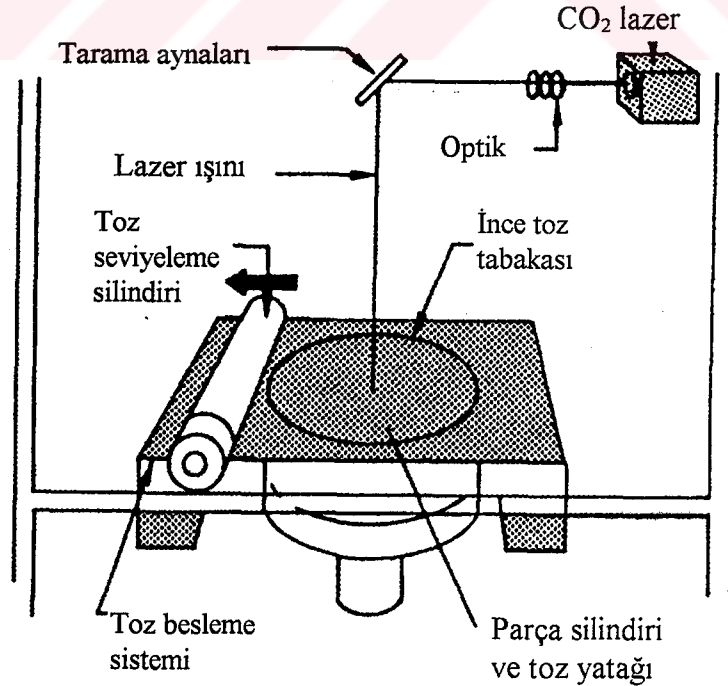
Üretilen modeller temelde iki farklı kategoriye ayrılır.

1. Bir tasarımın boyutsal doğruluğunun bakılması için yapılan modeller.
2. Parçanın değişik formları için döküm gibi daha fazla işlemlerde kullanmak üzere üretilen modeller.

Üretilen model, kum kalıp dökümde model parça olarak veya hassas dökümde yakılmak suretiyle değişik formlar elde etmek üzere kullanılabilirler. Daha fazla parça elde etmek için silikon kalıp üretimi yapılabilir.

2.4 SEÇİCİ LAZER SİNERLEME (SLS - Selective Laser Sintering)

Bu yöntem DTM Corp. tarafından geliştirilip Austin'de piyasaya sürülmüştür. EOS GmbH aynı prensiple çalışan bir makinaryı geliştirmiştir. Bu yöntemde, toz haline getirilmiş termoplastik malzemenin bir lazer ışını ile eritilerek üç boyutlu parçalar oluşturulur (Şekil 2.9).

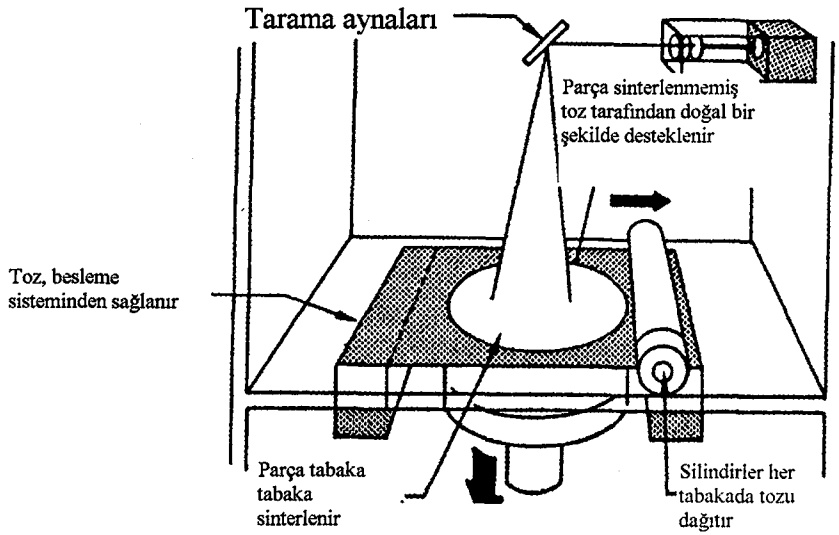


Şekil 2.9 SLS sistemi çalışma elemanları

2.4.1 SLS Sisteminin Çalışması

Toz halindeki termoplastik malzeme, işleme bölümüne bir silindir yardımıyla düzgünce yayılır. Sonra, parça kesitine uygun numune, toz yüzeyinde lazerle çizilir (Şekil 2.9). Amorf malzemede lazer ısı, toz parçacıklarının eriyerek birbirlerine yapışıp kütle oluşturmaya neden olur. Bu işlem *eritme* veya *sinterleme* olarak tanımlanır. Kristalin malzemede ısı, toz tabakasının erimesine ve soğutulunca katılaşacak sıvıya dönüşmesine neden olur. Her tabaka, üzerinde kalan tozla şekillenir. Tüm tabakalar şekillendirildiğinde bitmiş parça, daha sonra alınacak olan serbest toz kalıbı içerisinde gömülü durumdadır.

Parça, bir hareket eden piston tarafından desteklenen toz silindirin de şekillendirilir (Şekil 2.10). Silindir iki taraftan beslenen tozu içeren taşınabilir kartuşlarla kuşatılmıştır. Bir dönme/seviyeleme silindiri tozun bir kartuştan diğerine hareket etmesi için diğer yöne dağıtır. Bir 50 W CO₂ lazer, 10.600 nm dalga boyunda kızıl ötesi radyasyon üretir. Bu bir çok malzeme tarafından emilip sıcaklıkların yükselmesine neden olur. Lazer radyasyonu parça silindirindeki toz yüzeyine odaklanır. Bilgisayar kontrollü tarama aynaları ışığın pozisyonunu yönlendirir.



Şekil 2.10 SLS sisteminin çalışması

Parça işleme bölümü asal gazdan temizlenir ve ısıtılarak tozun üstteki tabakalarının, malzeme erime sıcaklığına yakın sıcaklıklara getirilir. Ortamın ısınması, tozu erime sıcaklığına getirmek için harcanan ilave lazer enerjisini düşürür. Ayrıca imalat sırasında tabakaların çekmesi dolayısıyla çarpılmayı engeller. Tüm tabakalar işlendikten sonra, parça pistonu yükselir. Kalan toz, parça üzerinden bir spatula veya bıçakla alınır.

Sıvı polimer yerine farklı malzeme tozları bir silindir tarafından bir platforma yayılır. Bir lazer, erimesine daha sonra da katılaşmasına neden olan seçilmiş alanları sinterler. Sinterlemede iki çeşit geçiş vardır: katıdan sıvıya ve tekrar katıya. Bu yöntem *seçici lazer sinterleme* olarak adlandırılır.

2.4.2 SLS Sisteminde Kullanılan Malzemeler

Kullanılan malzemeler plastikler, mum, metaller ve kaplama seramiklerdir.

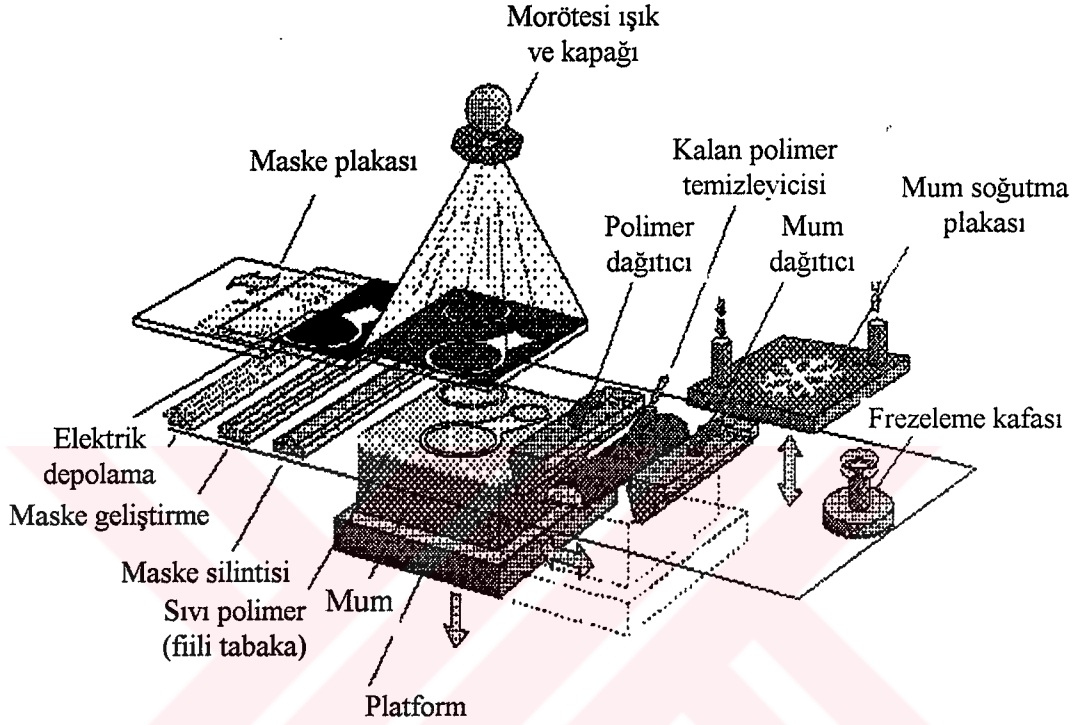
Aşağıda Tablo 2.7' de, SLS sisteminde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

Tablo 2.7 Bazı SLS malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Firma	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastiklik modülü (GPa)	Maks.Çekme dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)	Darpe direnci (Izod, kJ/m ²)	Fiyat (\$/cm ³) (1993 ABD doları olarak)
LN-4000	BF Goodrich /Laserite	1.02	1.20	40	38	70	0.146
LPC-3000	BF Goodrich /Laserite	0.82	1.05	15	4	37.5	0.135
LWX- 2010	BF Goodrich /Laserite	0.98					0.161

2.5 KATI TABAKA KURUTMA (SGC-Solid Ground Curing)

SGC (SOLIDER) sistemi (Şekil 2.11) Cubital Ltd. (İsrail) tarafından geliştirilip piyasa sürülmüştür[14].



Şekil 2.11 SGC sisteminin şematik görünümü

2.5.1 Çalışma Aşamaları

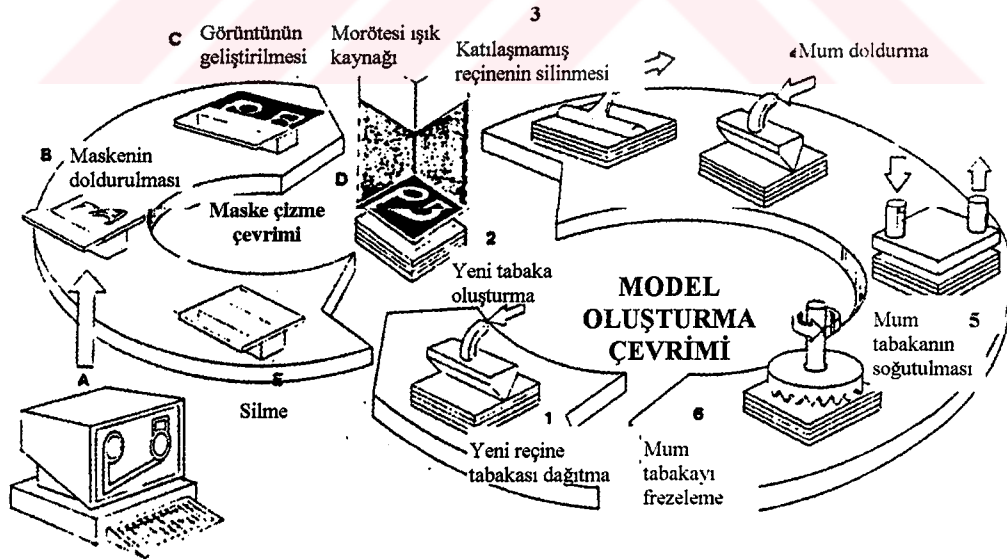
Parça eksenlerinin tanımlanmasından sonra dilimleme için tabaka kalınlığı tanımlanır. Maske oluşturulurken, çalışma platformu ince sıvı fotopolimer malzeme ile kaplanır. Daha sonra çalışma bölümüne konumlandırılır. Optik maske, platform üzerine hassas bir şekilde getirilir. Kapağın açılması ile iş parçası 3 sn süre ile 2.0 W güçteki morötesi ışığa maruz kalır. Işık maskeden tabakayı tamamen kurutur. İşlenmemiş kısımlar sıvı şekilde kalır. İş parçası kalan sıvı polimeri alan aerodinamik silcek altından geçer ve yalnızca katılaşmış kısmın arkasında kalır (Şekil 2.12).

Maske levhası maske çiziciye döner , boşaltma ve silme işlemleri ile ilk tabaka maskesini gelecek tabakaya hazırlar. İş parçası şimdi gelecek istasyona hareket eder. Burada eritilmiş mumu ince tabakası yüzey üzerine yayılır, tüm boşluklar ve işlenmemiş sıvının giderilmesinden sonra, kalan çukurlar doldurulur. Bir soğutma levhası yüzey üzerine alçalarak soğutma ve katılaştırma yapar.

İş parçası, tabaka kalınlığını daha önceden tanımlanan değere indiren bir freze takımının altına geçer. Böylelikle gelecek tabaka için düz ve iyi bir yüzey hazırlanmış olur. bu işlem parça tamamlanuncaya kadar devam eder.

Son tabaka tamamlandığında, model veya mumu bloğuna gömülmüş durumdadır. Mum bir mikrodalga fırında eritilebilir. Sıcak bir hava tabancası veya 60°C sıcak su kullanılır.

Modellerde doğruluğun elde edilmesi tam kurutma ve her tabaka işlenirken desteklenmesi ile gerçekleştirilebilir. x-y düzlemlerindeki maskenin doğruluğu, her tabakanın z düzleminde istenilen kalınlığa tam getirilmesi ile sağlanır.



Şekil 2.12 SGC çalışma şeması

2.5.2. SGC Sisteminde Kullanılan Malzemeler

Bu işlemde de morötesi ışıklara duyarlı polimer malzeme kullanılır (Tablo 2.8).

Tablo 2.8 Bazı SGC malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Firma	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastiklik modülü (GPa)	Maks.Çekme dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)	Fiyat (\$/cm ³) (1993 ABD doları olarak)
Tip G	Coates/Solimer	1.1	0.88	35	16	0.071
Tip F	Coates/Solimer	1.1	0.23	13	55	
4112- 143-1	DSM/DeSolite	1.2	1.0	36	18	0.031

2.5.3 SGC Sisteminin Diğer Yöntemlerle Farklılıkları

İlk farklılık; polimerin bulunduğu kabın hareketidir. Burada kap hem düşey hem de yatay doğrultuda hareket edebilmektedir. Yatay hareketler iş parçasının makinede farklı istasyonlara gelmesini sağlar.

İkincisi; ışık kaynağı ile ilgilidir. Bir lazer demeti kullanımı yerine, ilgili bölümü tamamen ışıkla doldurmak ve tabakayı bir kerede katılaştırmak amacı ile morötesi lamba (civalı) kullanılır. Bu sakıncalar parçalara bir ön kurutma uygulamayı gerektirir. Kurutulması düşünülen alanların seçimi için bir maske bir cam levha üzerinde yapılır ve kullanıldıktan sonrada silinir. Maske lazer yazıcılarda kullanılan benzer bir işlemle yapılır. Maskeli cam levha, lamba ve iş parçası arasına yerleştirilir.

Üçüncü farklılık; parçalar mum ile etrafları sarılmış bir şekilde üretilir, destek yapı ihtiyacı giderilmiştir. Bir defada bir tabaka morötesi lambaya maruz bırakılmıştır. Kalan sıvı polimer ile dolmuş olan kurutulmamış alanlar mum ile yer değiştirilir. Bu, kalan sıvı polimerin temizlenmesi ve bir mum tabakasının uygulanması ile

gerçekleştirilir. Mum, bir soğuk metal kullanılarak sertleştirilir ve sonradan tabakanın doğru yüksekliğe getirilmesi için frezelenir. Freze istasyonu tabakaların taşınmasına imkan verir yani geri dönüş işlemi yapmak mümkündür. Polimerin yeni tabakası, iş parçası freze istasyonundan işlem görmüş bölgeye geri döndüğünde uygulanır.

Son gelişme, iş parçasının boyut büyüklüklerinin değiştirilebilmesi ve ek morötesi lambanın bulunması olarak gerçekleşmiştir.

2.5.4 Doğruluk

HPÜ'nde en genel problemler, çekme ve çarpılma olaylarıdır. Bunlar, bitmiş parçanın doğruluğunu etkiler. SOLIDER 5600 sisteminde % 0.1 hassasiyette çalışılabilmektedir.

2.5.5 SGC Yönteminin Üstünlükleri

- İnce kısımlarda çekme ve çarpılmanın minimuma indirilmesi
- Son kurutmaya gerek duyulmaması
- Destek oluşturmak için yazılıma gerek duyulmaması
- Model dayanımı ve dengesinin yüksek olması ve modellerin düşük gevrekliğe sahip olması. Bunun nedeni, iç gerilmelerin minimum seviyede olmasıdır. Bu nedenle daha iyi polimerlerin kullanım olanağı çıkar.
- Geometrik sınırlamaların olmaması
- Tehlikeli bir gaz çıkarmaması. İşlemede kullanılan reçine kısa bir zaman için sıvı haldedir. Kurutulmamış reçine hemen alınır. Dolayısıyla güvenlik yüksek seviyededir.
- Mumun kullanıldığı döküm işlerine model sağlayabilmesi.

2.6 HPÜ TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Kullanıcı yönüyle bakıldığında, bir parça üretiminde zaman, fiyat ve fonksiyonellik çok önemli olmaktadır. HPÜ teknolojilerinde her işlemin fiyat, doğruluk, malzeme,

geometri ve büyüklük yönleriyle çeşitli kısıtlamaları vardır. Aşağıdaki tablolarda HPÜ teknolojileri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır (Tablo 2.9 ve 2.10).

Bu karşılaştırmada, sistemlerin yeterlilikleri ve fiyatları göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 2.9 Bazı HPÜ teknolojilerinin yeterlilikleri yönüyle karşılaştırılması

İşlem	SLA 250	FDM 1650	SOLIDER 5600	SLS 2000	LOM 1015
Firma	3D Systems	Stratasys	Cubital Ltd.	DTM Corp.	Helisys
Maks. parça büyüklüğü [mm]	250 x 250 x 250	250 x 250 x 250	500 x 500 x 350	305 x 380 (θ x yükseklik)	340 x 250 x 380
Tabaka kalınlığı (min.-maks.) [mm]	0.1 - 0.9	0.050 - 0.750 0.250 - 2.500 (yol genişliği)	0.05 - 0.15	0.13	0.005 - 0.050
Hız (düşey)	Parça büyüklüğüne bağlı	Parça büyüklüğüne bağlı	60-100 tabaka/saat	Parça büyüklüğüne bağlı	10 mm/saat
Doğruluk [mm]	0.2	± 0.125	% 0.1 (tüm yönlerde)	± 0.05 - ± 0.25	± 0.125
Malzemeler	Fotopolimer reçineler	ABS, MABS Hassas döküm mumu, bazı elastomerler	Fotopolimer reçineler, mum	Termoplastik malzemeler, (PVC.naylon, ABS/SAN), mum	Kağıt, naylon, polyester

Tablo 2.2’ de yer almayan yeni bazı sistemler daha üstün özelliklere sahiptirler. Örneğin SLA-500 sisteminde (500x500x610) mm büyüklüklerde parçalar 0.01 doğrulukta üretilmektedir. Bu sistemde argon iyon lazeri kullanılmaktadır. LOM 2030 sisteminde (760x500x500) mm büyüklüklerinde parçalar üretilmektedir. Bu sistemde malzemelerin kesilmesi için 50 W CO₂ lazeri kullanılmaktadır[15].

Tablo 2.10 Bazı HPÜ teknolojilerinin maliyetler yönüyle karşılaştırılması

İşlem	Firma	Makina Maliyeti (ABD doları olarak, Ocak 1993 fiyatları)	Malzeme Maliyeti [$\$/\text{cm}^3$] (ABD doları olarak 1991 fiyatları)
SLA-250	3D Systems	220,000	0.080
SLA-500	3D Systems	450,000	0.080
3D Modeler	Stratasys	172,000	0.072
SOLIDER 5600	Cubital Ltd	550,000	0.026
SLS 2000	DTM Corp.	289,000	0.079
LOM 1015	Helisys	95,000	0.006
LOM 2030	Helisys	180,000	0.006

Tablo 2.10' da görüldüğü üzere, SOLIDER 5600, SLA-500 ve SLS 2000 sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri diğerlerine göre yüksektir. Malzeme maliyetleri yönüyle SOLIDER 5600 daha ucuz görülmektedir. SLA sistemlerinde yaklaşık 10,000 \$ (Ocak 1993 ABD doları olarak) tutarında son ısıtma düzeneği de gereklidir.

SLA-250 ve 3D Modeler sistemleri daha düşük ilk yatırım maliyetlerine sahiptir. Malzeme yönüyle 3D Modeler sistemi daha ucuzdur ayrıca üretilen prototiplerin son ısıtma ihtiyaçları olmadığı gibi mekanik özellikleri de SLA prototiplerden çok daha iyidir.

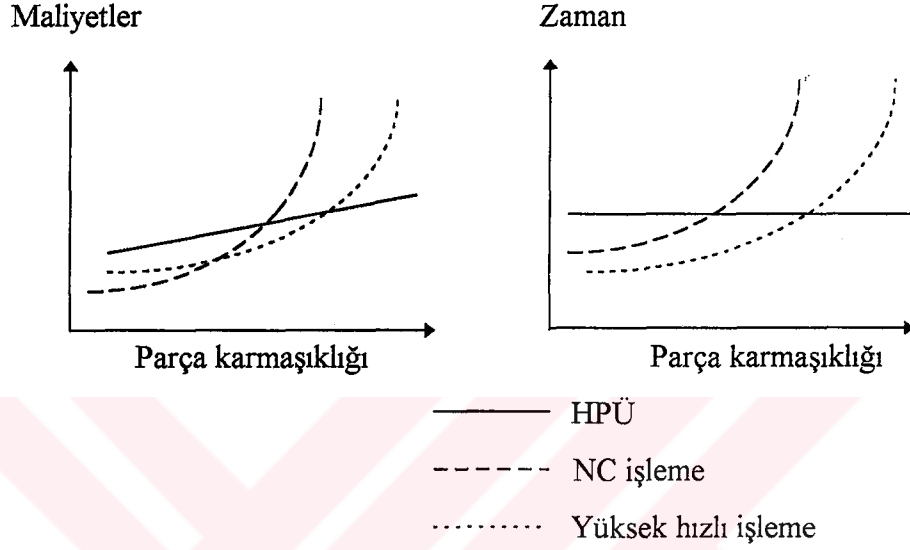
LOM sistemleri düşük ilk yatırım ve malzeme maliyetleri ile en ucuz HPÜ teknolojisi olarak görülmektedir. Ama üretilen prototiplerin kağıt esaslı olması bazı sınırlamaları getirmektedir.

Tüm sistemlerde, yazılım ve servis anlaşmalarına bağlı ek maliyetler de söz konusudur.

Herhangi bir HPÜ sisteminin seçiminde doğruluk, hız ve ekonomikliğin yanında alıcının isteklerine bağlı bazı faktörler de etkin rol oynar.

2.7 HPÜ İLE KLASİK YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

HPÜ, NC ve yüksek hızlı işleme veya elle işleme gibi klasik teknolojilerin yerini tamamen almış değildir. Şekil 2.13’ de HPÜ ile klasik metotlar maliyet ve zaman açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.13 HPÜ ile klasik yöntemlerin karşılaştırılması

Şekil 2.13’ den görüldüğü gibi parça, diğer klasik teknolojiler kullanılarak da imal edilebilir. Eksenlere herhangi bir değer verilmeme sebebi, bunun şirketlere göre değişmesidir. HPÜ, karmaşık parçaların birden fazla kopyalarının yapılmasının zorunlu olduğu durumlarda açık avantajlar sağlar.

BÖLÜM 3

BDT İŞLEMLERİ

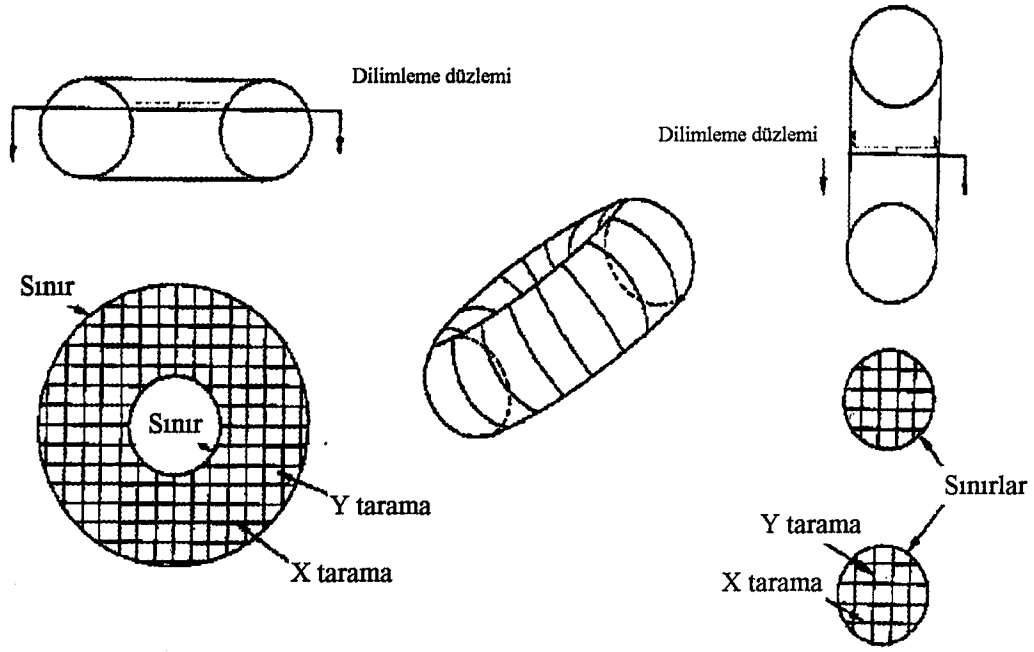
Mevcut HPÜ teknolojileri için gerekli geometrik tanımlamalar BDT sistemleri ile gerçekleştirilir. Üretilen parça prototipinin BDT sisteminde oluşturulmuş katı modeli, üretilen sisteme uygun standart formata çevrilerek HPÜ makinasına aktarılır. BDT işlemleri, HPÜ teknolojilerinde parça kalitesini ve doğruluğunu etkiler. Üretilen prototip üzerinde değişiklik yapılmak istenildiğinde, geri dönüş yapıp parçanın BDT resminde değişiklikler yapılır.

BDT sisteminde üretilen olan prototipin katı modeli oluşturulur. HPÜ sistemleri doğrudan bu katı modeldeki geometrik verileri kullanarak parçanın üç boyutlu olarak üretilmesini sağlar.

3.1 VERİ İHTİYAÇLARI

Geniş bir şekilde kullanılan HPÜ sistemlerinin yazılımları, oluşturulacak parçanın geometrisinin kesin verisine ihtiyaç duyar. Model verisi kapalı yolların oluşturulmasını ve parçanın iç ile dış kısımları arasındaki farklılığı kolaylaştırmalıdır. Parçanın kesitinin alındığını kısım en az bir yada daha fazla kapalı yollar ve katı alanları tamamen ifade eden bir bölüm olmalıdır. Şekil 3.1' de bir troidin dilimleme örnekleri gösterilmiştir.

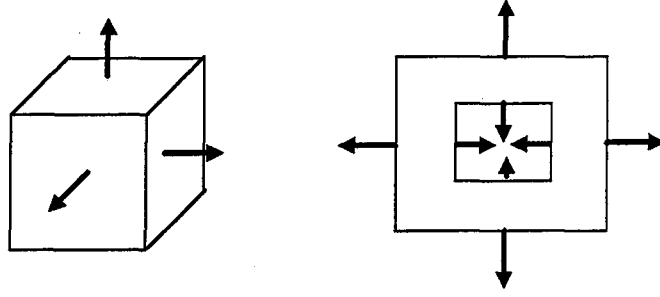
Herhangi bir katı model, bilgisayar ortamında verilen dilimleme düzlemine göre paralel vektörlerle dilimlenir. Bu veri, HPÜ sistemlerinde parçanın istenilen kesit formunda üretilmesi için gereklidir.



Şekil 3.1 Kapalı bir modelde dilimleme örnekleri

Çapraz tarama ile oluşturulan vektörler, parça sınırları arasında kalan alanlarının katılaştırılmasını sağlar. Parça geometrisi tamamen kapalı değilse problemler ortaya çıkar çünkü, komşu yüzey kaybolur. HPÜ sistemi yazılımları nasıl kapalı boşlukların oluşturulacağına karar vermek zorundadır. Aksi taktirde sistem, parça işlemeyi kötü etkileyecek işlemler yapabilir. Sınırlardaki boşluklar tarama vektörlerinin eksik yada parça dışına kaçmasına neden olabilir. Kapalı sınırlar yalnızca katı cisimleri tanıtmaz. Ayrıca sınır verisi katı alanların uyumunu da ifade eder.

Yüzey normali, cismin kütle uyumu bilgisini gösterir. Eğer bu bilgi yanlışsa duvar kalınlıkları sıfır anlaşılabilir yada değişik uyumsuzluklar söz konusu olabilir (Şekil 3.2). Herhangi bir yüzeyin normali o yüzeyin katı modelde sahip olduğu kalınlık yönünü ifade eder. HPÜ sistemlerinde, katı modelde kalınlığa sahip olmayan kısımlar problem oluştururlar. Sistemlerin kendi yazılımları katı modelde oluşabilecek bu tür hataları düzeltebilmektedir.



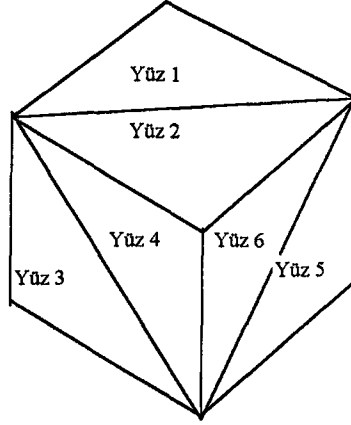
Şekil 3.2. Yüzey normalleri

3.2 KATI MODELLEME

Bir katı model sınırlandırılmış bir hacmin geometrik gösterimidir. Bu hacmin gösterimi grafiksel olarak eğri ve yüzeylerle sağlanır. Bunun yanında, grafiksel olmayan katı modelde bulunan bir mantıksal ilişki olan topolojik ağaç yapısı şeklinde de gösterilebilir. Topolojik veri, değişik yüzler ve geometrideki yüzeyler arasındaki bağlayıcı ilişkileri tanımlar.

Çoğu BDT sistemi katı modellemeye doğru matematiksel kavramlar dizisi kullanır. Özellikleri;

1. Yapıcı katı geometri (CSG) modelleyicileri küp, koni ve küre elemanlar gibi basit geometrik şekiller kullanırlar. Bunlar işleme bloklarını oluştururlar. Bu bloklar Boolean operasyonları olan toplama, kesişme ve çıkarma işlemleri kullanılarak birleştirilirler. Hiyararşik olarak CSG ağacı denilen bir yapıda gösterilir.
2. Sınır gösterim (BREP) sistemleri çok bölümlü (polynomial) veya NURBS (Nonuniform rational B-splines) tabanlıdır. NURBS iki boyutlu, üç boyutlu ve yüzey özelliklerinin basitten karmaşığa doğru kolayca ifade edilebilme imkanı olan geometrik matematiksel tanımlamalarıdır.
3. Yüzleme (faceted), katı modelin düzlemsel yüzeylere bölündüğü bir tekniktir (Şekil 3.3). Bu yüzeylerde üçgen veya dörtgen birimlere bölünebilir. Bunların yoğunluğunun artması lineer olmayan yüzeylere yaklaşmayı sağlar.



Şekil 3.3 Üçgenlerle yüzlenmiş bir küp eleman

Geniş bir şekilde kullanılan yazılımlar:

- CATIA
- I-DEAS
- Unigraphics
- Pro/Engineer
- Alias Designer

3.3 3D YÜZEY MODELLEYİCİLERİ

BDT sistemlerindeki ekstrüzyon, süpürme, döndürme işlemleri ile oluşturulan iki boyutlu tel kafes profiller kullanarak arzu edilen yüzey elde edilebilir. Karmaşık özellikleri elde edebilmek için bikubik spline' lar gibi matematiksel yaklaşımlar yapılır. Diğer Bezier eğrileri gibi çok bölümlü ifadeler de kullanılır. Çoğu ileri sistemler NURBS tanımlı ifadeler kullanırlar. NURBS tanımlaması ile kolay düzeltmelerin ve kontrolün yapılabildiği yüzey şekilleri sağlanabilir.

Yüzeyler 3D yüzey modelleyicisinde sıfır kalınlıkta oluşturulurlar. Çoğu kez, karmaşık yüzeyler, özel bir profil eğrisinin verilen bir eksen etrafında döndürülmesi ile elde edilir.

3.4 BDT SİSTEMİNDE VERİ GÖSTERİMİ

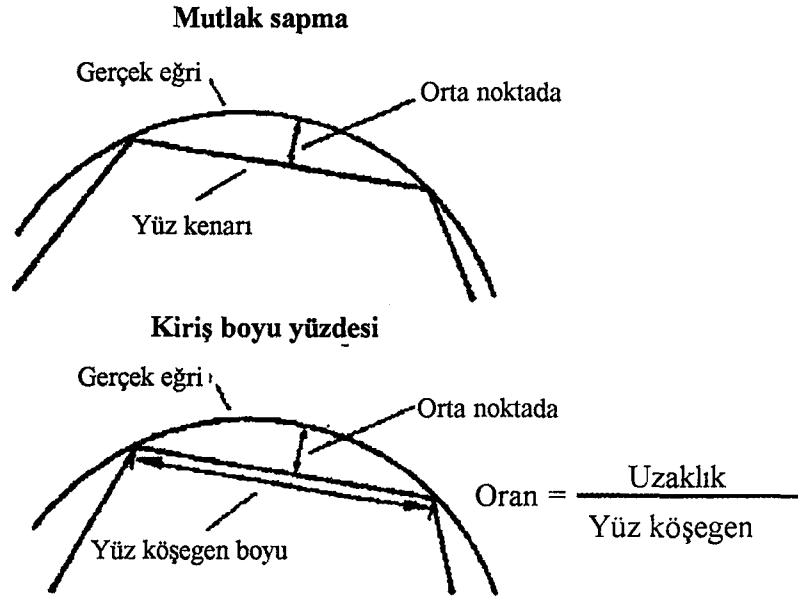
Gösterim metotları BDT geometrilerinin bir sistemden diğer başka bir sisteme aktarılmasının tanımlanmasında kullanılır. Farklı BDT sistem paketlerinden HPÜ sistemlerine geçiş için standart bir arayüzey gereklidir. Kullanılan standartlar her zaman katı modelin ifade edilmesinde yeterli olmaz. Bu nedenle HPÜ sistemleri kendilerine göre standartlar geliştirmişlerdir. Bunlardan birisi 3D System Inc. firmasının geliştirdiği STL arayüzey gösterimidir. Bu format artık tüm HPÜ sistemlerinin giriş standardı haline gelmiştir. NURBS tabanlı veya primitif CSG nesnelerden oluşturulmuş yüzeyler, düzlemler ve çizgiler kullanılarak yüzlenmiş bir formata dönüştürülür. Düzlemsel olmayan yüzeylerin doğruluk derecesi, yüzeylerin yüzlenmesinde kullanılan yüzey elemanının sayısı ile kontrol edilir.

3.5 BDT PARAMETRELERİ

BDT geometrisinin bölünmesin sistemden sisteme değişmektedir. I-DEAS' da bu işleme, doğru yüzeyden bir maksimum mutlak sapma ile başlanır.

Tolerans, Şekil 3.4' de gösterildiği gibi doğrudan eğriye maksimum kiriş yüksekliğin ifade edilmesidir. Bu, kiriş yüksekliğinin yüzdesi olarak alınır. Küçük değerler alınarak yapılan yüzleme işlemi gerçek yüzeye yaklaşımı artırır. Fakat STL dosyasının büyüklüğü artar. Bu da dilimleme zamanını ve dilimleme dosyası büyüklüğünü artırır.

I-DEAS 'da parçanın üçgen elemanlarla yüzlenmesi ile geometrik gösterimin gerçekleştirilmesinde, gerçek yüzeylere yaklaşım, "facet deviation" diye tanımlanan bir faktörün seçilmesi ile sağlanabilmektedir.



Şekil 3.4 I-DEAS yüzleme metodu

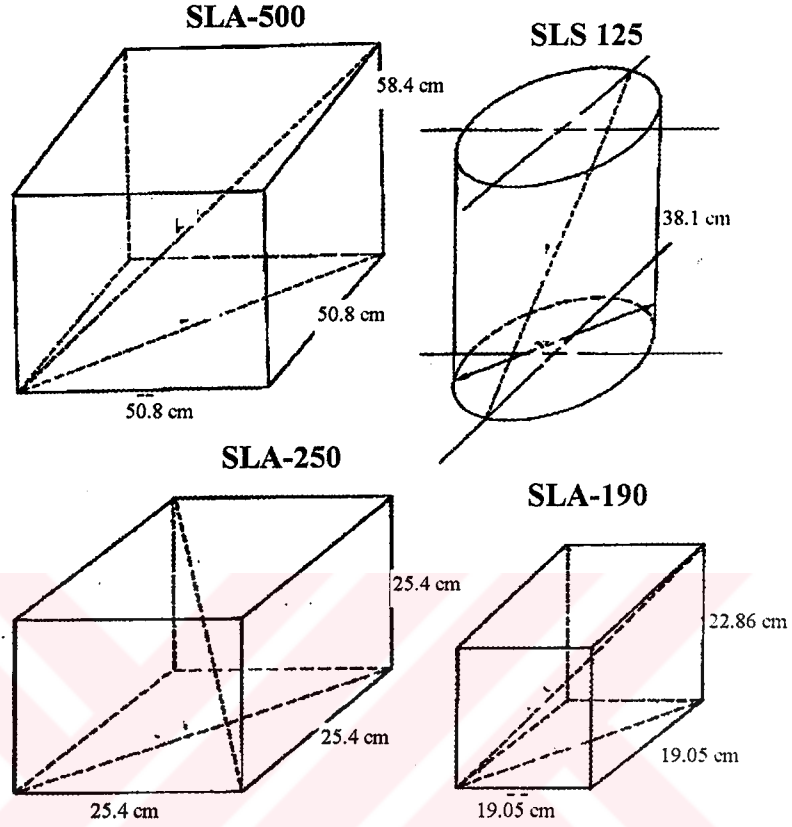
3.6 PARÇA ORYANTASYONU

Parça geometrisindeki değerler x, y, z yönlerinde pozitif değerlere sahip olmalıdır. Çünkü BDT gerçel sayıları dilimleme işleminde pozitif tamsayılara çevirir. Pozitif ve negatif BDT değerleri arasındaki fark kaybedilebilir. Pozitif bir yönlendirme, kullanıcının dilimleme işleminden önce STL dosyalarının yeniden yerleştirilmesinde uygunluk sağlar.

Dilimleme eksenini boyunca parçanın eğri yüzeylerinde merdiven adımı etkisi görülür. Her adımın yüksekliği parçanın o bölümünde kullanılan tabaka kalınlığını ifade eder. StereoLitografi sistemleri bir işleme çevriminde farklı tabak kalınlıklarında işlem yapabilmeye olanak tanır.

Bir parça büyüklüğü işleme sırasında tanımlanabilir. SL sistemi kübik bir işleme sistemine sahiptir. DTM firmasının SLS' si ise silindirik bir hacme sahiptir. Dikdörtgen bir hacimde çalışmanın bir avantajı, Şekil 3.5' de gösterildiği gibi, hacmin köşegen boyunun kullanılabilmesidir. Parçalar belirli bölümlere ayrılıp daha sonra

birleştirilebilirler. Parça üzerinde ilave işlemler bu sırada yapılabilir. Bunun için fotopolimer malzemeler veya değişik yapıştırıcılar kullanılabilir.



Şekil 3.5 Değişik HPÜ sistemleri çalışma hacimleri

3.7 DESTEK YAPILARI

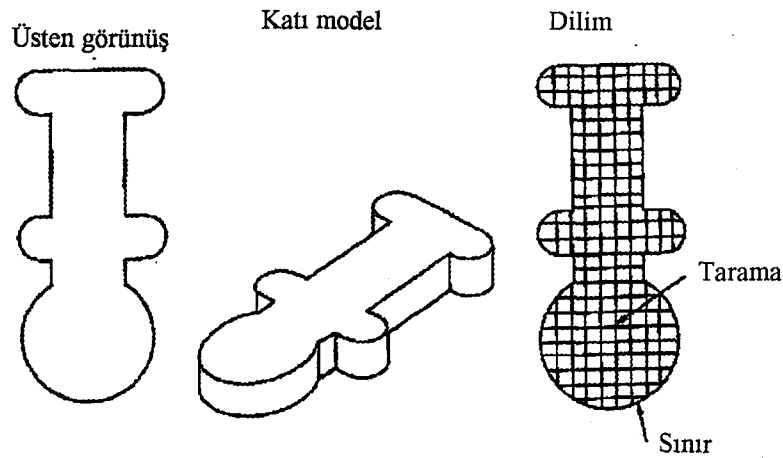
HPÜ sistemlerinde destekler, makinenin parçayı tutma elemanlarına benzetilebilir. BDT sistemlerinde oluşturulurlar ve parça için bunlardan ayrılan dosyalar şeklinde çıkışı alınır. Ek olarak, üçüncü grup yazılımlar otomatik olarak destek yapılarını oluşturabilirler. Mühendis veya BDT tasarımcısı tarafından da bu yapılar oluşturulabilir. SL sistemleri için, her parçaya destek yapıları gereklidir.

Su hariç tüm malzemeler sıvıdan katı faza geçişleri sırasında küçülürler. Malzeme yoğunluğun artması ile kütlede bir değişikliğin olmaması için hacim kaybına yol açar. Bu da çekme denilen hatanın oluşumuna yol açar. Zorlamalı olmayan bir çekme

kıvrılmaya neden olarak parça doğruluğunu kötü yönde etkiler. Bu yüzden destek yapılarının gerekliliği açıktır.

SL sisteminde ilk tabaka platforma tutturulur ve genelde bu, bir destek olarak kullanılır. Destekler ince duvarlardan oluşturulmuş değişik formlarda olabilen yapılardır. Genelde tek çizgide katılaştırılmış 0.18 mm- 0.3 mm kalınlığındadır. Tüm tipler, oluşturulmuş parça tabakalarının üzerine en az iki üç tabaka kalınlığı kadar (yaklaşık 0.5 mm) içerisine girmiş olması gerekir. Bu kesişme desteklerin parçaya fiziksel olarak bağlanmasını sağlar.

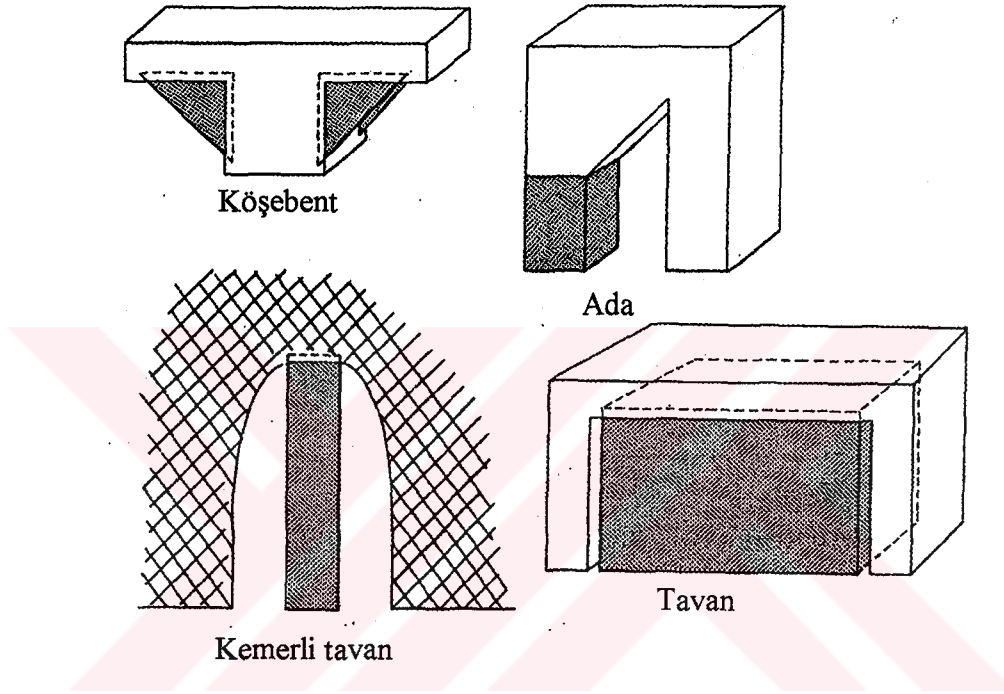
Her SL parçası platformdan parçaya geçişin ilk tabakalarının köprü oluşturması için temel bir desteğe sahip olması gerekir (Şekil 2.6). Temel destek kaplayıcı süpürmenin meydana gelemeyeceği bir çakışma tampon bölgesi sağlar. İlave olarak, temel destek parçanın işlem bittikten sonra platformdan güvenli bir şekilde alınmasını sağlar. Temel destek parçanın alt tabakasının köşelerini içeren çevresini takip etmelidir. Bu oluşturulan tabakaların kıvrılma eğilimlerini kısıtlar. Temel destekler katı cisimler olarak tasarlanabilir. Uygun dilimleme parametreleri, katı desteklerini yumurta kolisi şekline dönüştürecektir. Bu formdaki desteklerde boşluk, dilimleme yazılımında x ve y tarama boşluğu gibi 6.35 mm ölçüsü kullanılarak oluşturulurlar.



Şekil 3.6 Katı modelden taranmış temel desteğe geçiş

Adalar parçanın diğer bölümleri ile birleşmeyecek olan parça geometrisinin tabakalarıdır (Şekil 3.7). Bunlardır platforma yada parçanın kendisine sıkıca bağlanmalıdır. Parçanın tabakalarına tutturularak yapının rijit olması sağlanır.

Köşebent olarak adlandırılan güçlü üçgen formundaki destek yapıların yerinden alınması kolaydır ve STL dosya büyüklüğü ile uyumlu çalışabilir.



Şekil 3.7 Değişik destekleme türleri

Bridgeworks adlı programda tanımlı beş ana destek yapısı örneği aşağıda verilmiştir.

3.7.1 Köşebentler

Bunlar aşırı yüklenmiş bölgelerde kullanılır. İşleme sırasında aşırı yüklenmiş alanlar için bir yüzey sağlamak amacıyla, ilgili bölgedeki dikey duvara tutturulur. Temizlenmesi kolaydır. Köşebent boşluk parametresi, köşebent boşluğunun kontrolü için ve köşebent boyu parametresi, maksimum köşebent büyüklüğünün kontrolü için kullanılır (Şekil 3.8a).

3.7.2 Projelendirilmiş özel kenarlar

Desteklenmemiş ve köşebentlerin ulaşamadığı aşırı yüklenmiş alanların kenarlarına destek sağlanması için projelendirilir (Şekil 3.8b).

3.7.3 Tek ağlar

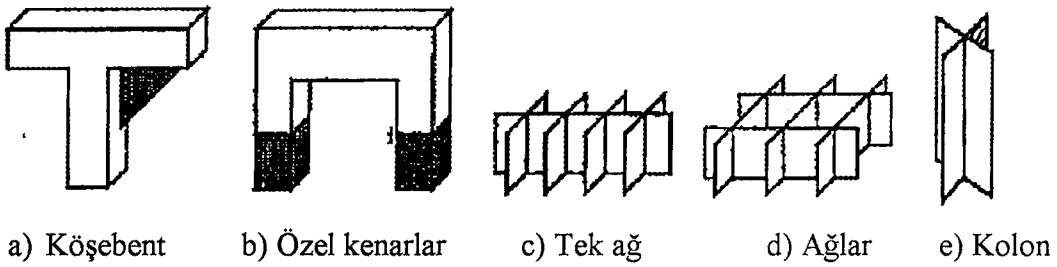
Bunlar dar yada keskin bir kenar için, bir kenarın merkezinden kenar boyunca olmak üzere tasarlanan tek bir duvardır. Yapıdaki çapraz kısımlar dengeyi sağlamak için konulur (Şekil 3.8c).

3.7.4 Ağlar

Geniş desteklenmemiş alanların iç kısımlarının desteklenmesi için kullanılan kesişmiş duvarlardır (Şekil 3.8d).

3.7.5 Kolonlar

Bunlar ada ve diğer küçük desteklenmemiş alanlara destek sağlamak için kullanılır. bir kolon iki duvarın “+” formunda bir araya gelmesiyle oluşturulur (Şekil 3.8e).



Şekil 3.8 Destek yapılarının beş temel bölümü

BÖLÜM 4

HPÜ SİSTEMLERİ YAZILIMLARI

HPÜ sistemleri verileri özel bir formatta kabul eder. Orijinal standart giriş, StereoLithography dosyası STL formatıdır. Bu format üç boyutlu üçgen elemanların parçayı döşemesi esasına dayanır. Çoğu BDT şirketleri dosyaların STL çıkışının alınmasına imkan tanır. HPÜ sistemleri için standart giriş formatı oluşmuştur. Endüstride değişik standart dosya formatları kullanılmaktadır.

4.1 IGES (Initial Graphics Exchange Specification) FORMATI

Bu format çoğu 2D ve 3D BDT sistem verileri için standartlaşmış bir formattır. Genel olarak BDT sistemleri direk olarak IGES formattaki modellerle çalışmazlar. Her birinin kendi formatı vardır. Bir BDT formatını başka bir formata çevirmek için IGES tarafsız formatı kullanılır. Sonra sonuç BDT sistem verisi tarafsız dosyadan oluşturulur. Her sistemin kendine göre değişik veri yapıları ve bilgi tipleri vardır. Bu dönüşümler sırasında kayıpların olmaması için IGES tarafsız formatını uygundur. Bu format, "U.S. Department of Commerce Document" tarafından tanımlanmıştır.

4.2 STL (StereoLithography) FORMATI

STL dosya formatı HPÜ için BDT dosyalarının SL sistemleri tarafından okunabilmesi amacıyla geliştirilmiştir. STL dosyası, bir parçanın dış yüzeylerinin üçgen elemanlar ile kaplanmış gösterimidir. Kaplanmış gösterim; her yüzeyin, tam olarak o yüzeyi ifade edebilen üçgen elemanla tanımlanmasıdır[16].

STL dosya formatının ASCII formu çok yer kapladığından genel kullanımlarda uygun değildir. ASCII STL dosya format yapısı aşağıdaki gibidir.

solid name

facet normal $n_i n_j n_k$

outer loop

vertex $v1_x v1_y v1_z$

vertex $v2_x v2_y v2_z$

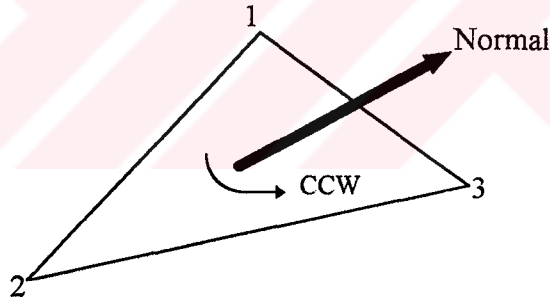
vertex $v3_x v3_y v3_z$

end loop

end facet

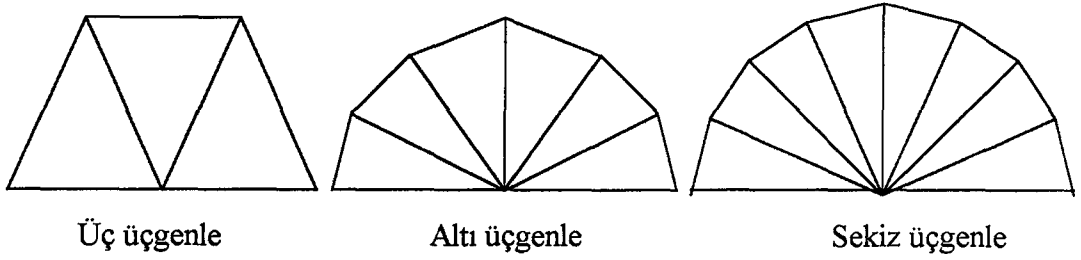
endsolid name

STL formatı, her üçgenin köşe noktalarının ve yüzeye ait yüz normali bilgisi (Şekil 4.1) içerir.



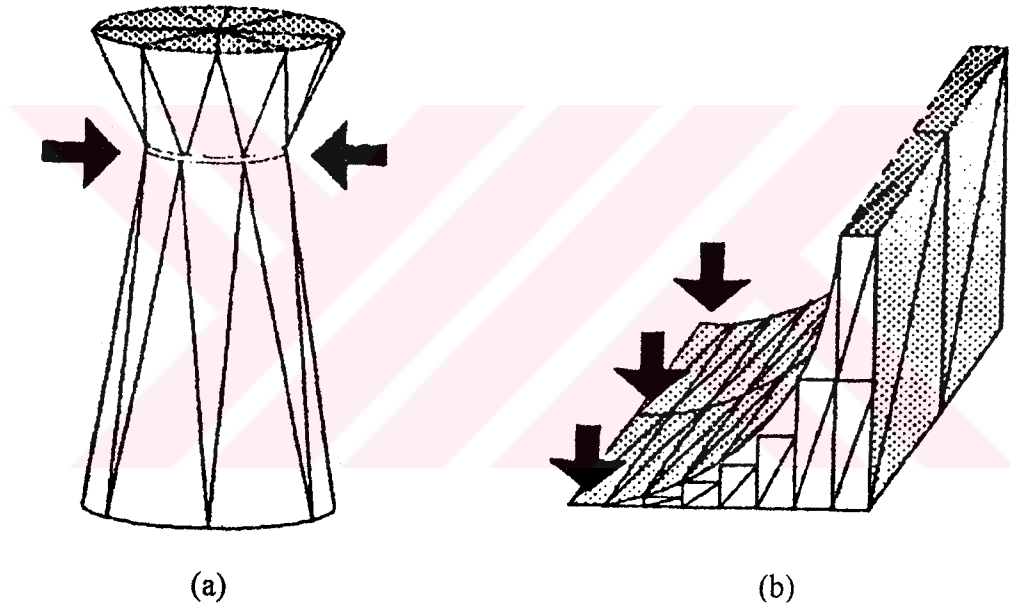
Şekil 4.1 Bir üçgen elemanın köşe noktaları ve doğru normali

Üçgenin köşe noktaları x,y,z koordinatları olarak tanımlanır. Şekil 4.2' de değişik formdaki yüzeylerin nasıl döşendiği gösterilmiştir. STL dosyasındaki her kenar başka bir kenarla çakışmak zorundadır[17].



Şekil 4.2 Bazı yüzeylerin üçgenlerle döşenmesi

Döşeme işleminde bazı hatalı kısımlar (Şekil 4.3) meydana gelir. Bu hatalar, HPÜ sisteminde üretime başlamadan önce ilgili yazılım kullanılarak düzeltilir veya minimuma indirilir.

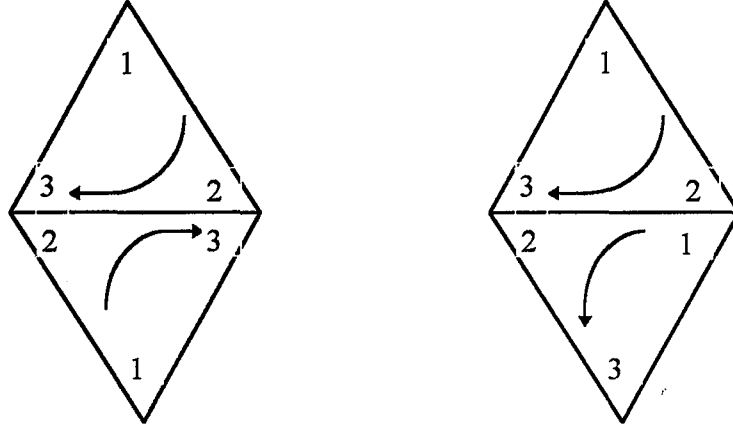


Şekil 4.3 Döşenmiş katı modeller ve hatalı kısımlar

a. Kesişen iki yüzey arasındaki boşluk

b. Çökmüş üçgenler

Birbirine komşu iki üçgen elemanda yanlış normaller tanımlanması STL dosyasında problemlere yol açabilir. Şekil 4.4' de doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu gösterilmiştir. Normaller sağ el kuralına göre tespit edilir. Üçgenin içerisindeki numaralar STL dosyasında listelenen koordinatların üçgende ki köşe numaraları gösterir.



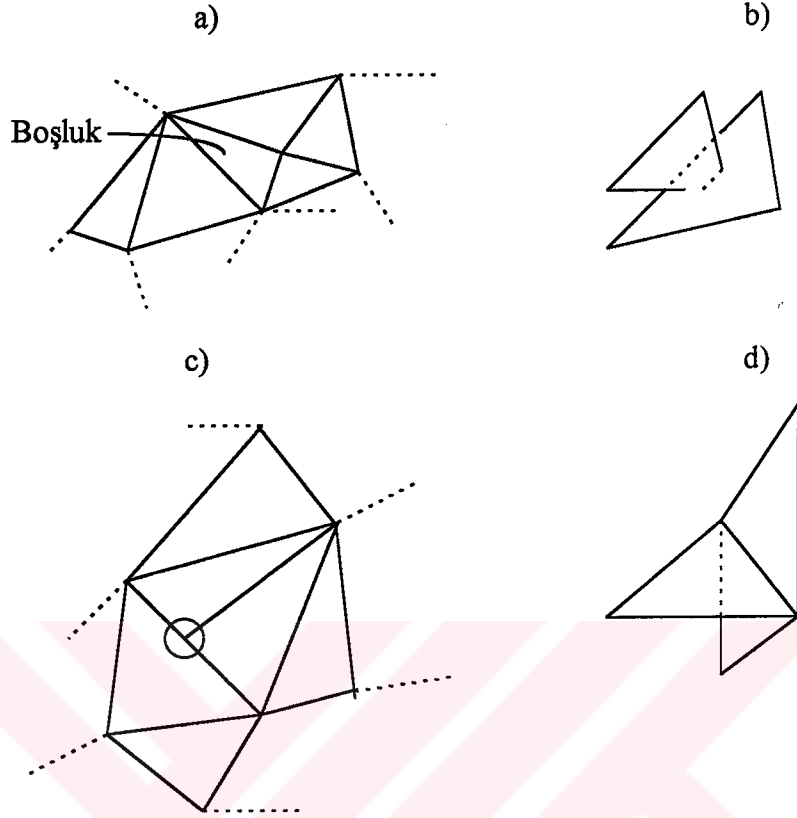
Şekil 4.4 Doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu

Doğru bir STL dosyasında her üçgen eleman, her kenar boyunca tek bir tane komşuya sahiptir. Üçgenlerin yalnızca genel kenarlarında ve tepe noktalarında kesişmelerine izin verilir. Bu şartlar altında modelin iç kısmını dış tarafından ayırmak mümkündür.

Sık bir şekilde yanlış döşenmiş modeller kullanılır. Hatalar sayısız olabilir. Modellerde yanlışlıklar nedeniyle boşluklar oluşabilir. Bu gibi hataların meydana gelmesinin nedeni, 3D BDT modeldeki hatalar ve kullanıcı kaynaklı olabilir[18].

HPÜ sistemlerinin yazılımları ve kendi BDT modülleri STL formatındaki herhangi bir parçanın katı modelinin üçgenlenmiş halinde yapılmış yanlış gösterimleri düzeltebilecek bir yapıdadır. Bu yazılımlar kullanılarak hataların bir çoğu düzeltiler.

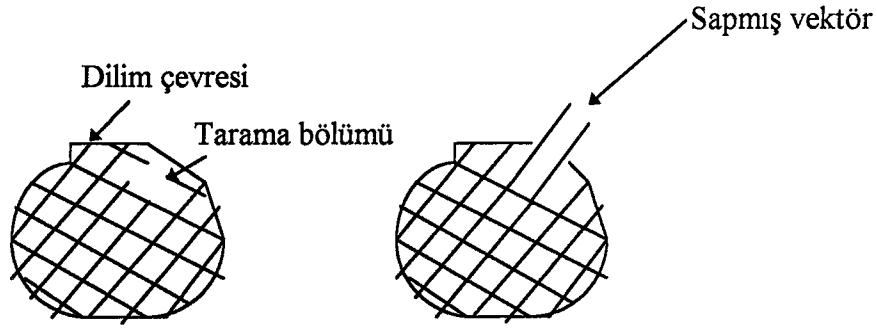
Bu hatalar genelde, üçgen elemanlar arasında kalan boşluklar, iki üçgenin kesişmesi, üçgenin bir kenarının birden fazla kenarla komşu olması veya üçgenlerin üst üste gelmesi gibi hatalardır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Yanlış yüzleme

a)- Boşluk , b)- Kesişme, c)- Fazla komşuluk d)- Üst üste gelme

Modeldeki yanlışlıklar imalatta problem oluşturabilir. Örneğin dilimin iç kısmı işlenirken dilim bir boşluğa sahip ise (Şekil 4.5a), sapmış vektörler meydana getirebilir (Şekil 4.6). Bu büyük bir ihtimalle gerçekleşir. Böyle bir durumda küçük çaplı lazer demeti (SLA' da yaklaşık 0.2 mm) seçilir. Tarama çizgileri arasındaki mesafe aynı şekilde uzak olabilir. Bu sapmış vektörler parçanın ve aynı platform üzerindeki diğer parçaların hasarına sebep olabilir.



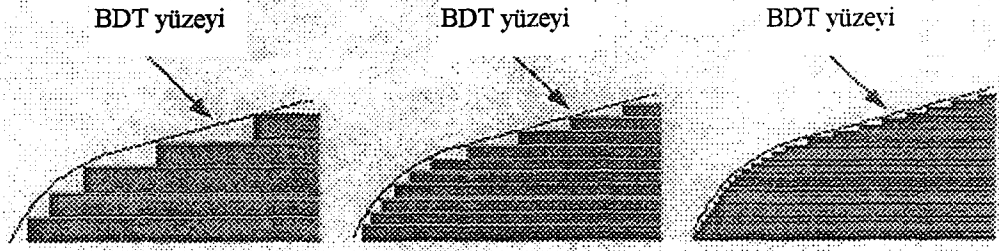
Şekil 4.6 Doğru ve yanlış dilimler

Üçgenler arası boşluk veya yanlış normaller gibi hataların düzeltilmesi için 3D Systems firması “3Dverify” adlı bir program sunar. Bununla birlikte dosya gösterme programları hem DOS hem de iş istasyonunda anormalliklerin tanımlanmasında yardımcı olur. Doğal olarak tüm hataların düzeltilmesi mümkün değildir.

4.3 SLA-190, 250, 500 YAZILIM BİLGİLERİ

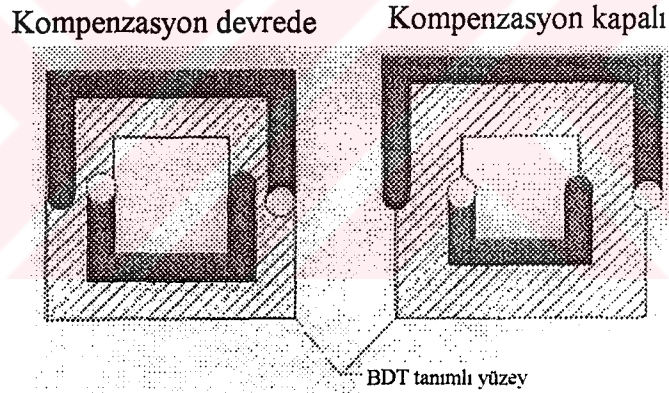
- **Giriş Dosyası Üniteleri :** Bunlar genelde BDT üniteleridir ve mm tanımlıdır. mm veya inch olarak tercih edilebilir.
- **Sonuç Parçanın Tabaka Kalınlığı :** Eğer dosya dış çevre verisi (kesit formunda) içeriyorsa, bu parametre giriş dosyasından okunur. Parçanın değişik bölgelerinde farklı tabaka kalınlığı kullanabilme yeteneğine sahiptir. Tabaka kalınlığının düşük seçilmesi merdiven adımı etkisini azaltır (Şekil 4.7) fakat işleme zamanını artırır. Tanımlı değer : 0.25 mm, çevrim aralığı : 0.0635-0.50 mm.

Tüm HPÜ sistemlerinde merdiven adımı etkisi görülmektedir. Bu etki SL yönteminde de özellikle dilimleme eksenine dik eğrisel kenarlarda ve yüzeylerde görülür. Uygun z-ekseni seçimi ve optimum tabaka kalınlığı seçimi ile minimuma indirilebilir.



a) Büyük tabaka kalınlıkları b) Orta tabaka kalınlıkları c) Küçük tabaka kalınlıkları
Şekil 4.7 Farklı tabaka kalınlıklarında merdiven adımı etkisi

- **Sonuç Parçanın Lazer Çizgi Kalınlığı Kompensasyonu :** Bu fonksiyon, parçanın sınırlarında katılaştırılma lazer çizgi kalınlıklarını işletir. Lazer çizme sırasında sınırların doğruluğu için, çizgi kalınlığının yarısı kadar parçanın kütlesi tarafına kaydırma (offset) yapılmak zorundadır (Şekil 4.8). Tanımlı : 0 (kullanılmaz), çevrim aralığı: 0 veya 0.025-0.050 mm.



Şekil 4.8. Lazer çizgi kompensasyonu

- **Her x Vektörü Arasındaki x Tarama Boşluğu Kontrolü :** Tanımlı değer : 0.25 mm, çevrim aralığı : 0 (x tarama vektörleri etkisiz yapar) yada 0.025-25 mm.
- **Y Tarama Boşluğu :** X için tanımlanan değerlerin aynısı fakat y yönünde.
- **60/120 Tarama Boşluğu :** Bu, 60° ve 120° açılarda çapraz tarama yapısında uzaklık dağılımını kontrol eder. Bu parametre üçlü taramaya uygulanır. Tanımlı

değer : 0 (60/120 çapraz tarama vektörlerinin çizimini etkisiz yapar), çevrim aralığı: 0 veya 0.025-25 mm.

- **X Kabuk (Skin) Boşluğu :** Her x kabuk vektörü arasındaki uzaklık dağılımını kontrol eder. Bu vektör parçanın yarıklarının doldurulmasında kullanılır. Tanımlı değer : 0.125 mm, çevrim aralığı : 0 (x kabuk vektörünü etkisiz yapar) veya 0.025-25 mm.

- **Y Kabuk Boşluğu :** Yukarıdaki ile aynı fakat y yönünde.

- **Sınır Katılaştırma (Border overcure SLA-500) :** Tüm sınır vektörlerinin katılma derinliklerini kontrol eder.

Gerçek sınır katılma derinliği = Tabaka kalınlığı + Sınır katılaştırma

Tanımlı değer : seçilmiş işleme türüne bağlı,

Çevrim aralığı : negatif tabaka kalınlığı - 0.508 mm.

- **Tarama Katılaştırma(Hatch overcure SLA-500) :** Tüm tarama vektörlerinin katılma derinliklerini kontrol eder.

Tarama vektörü katılma derinliği = Tabaka kalınlığı + Tarama katılaştırma,

Tanımlı değer : seçilmiş işleme türüne bağlı,

Çevrim aralığı : negatif tabaka kalınlığı - 0.508 mm.

- **Doldurma Katılaştırma (Fill overcure SLA-500) :** Tüm kabuk vektörlerinin katılma derinliklerini kontrol eder.

Gerçek kabuk doldurma vektörü katılma derinliği = Tabaka kalınlığı + Doldurma katılaştırma,

Tanımlı değer : seçilmiş işleme bağlı,

Çevrim aralığı : negatif tabaka kalınlığı - 0.508 mm.

- **Minimum Yüzey Açısı :** Bir düz yüzeyle dik doğru arasındaki açı olarak tanımlanır. Değeri kontrol eder. Tanımlı : 50° (0.25 mm tanımlı tabaka kalınlığında), çevrim aralığı : 0° - 90° .
- **Dilimlere Ayırma :** Her BDT birimdeki dilim sayısını tanımlar. Üç boyutlu ızgaralar oluşturarak, BDT birimleri küçük dilimlere ayırır. Dilim ayırma sayısı tüm parçalar için şekillendirme çevriminde aynı olmalıdır. Tanımlı : 200/mm, çevrim aralığı : 40-400/mm.
- **Dilimleme Eksenini :** Kesit alanına dik BDT eksenini tanımlar. Z eksenini boyunca dilimlenecek tüm parçalar için, platformda konumlandırıldığında çıkacak düzensizlikleri azaltmak için tavsiye edilir. Tanımlı : z eksenini, çevrim aralığı : x,y ve z.
- **İşleme Türleri (SLA-500) :** Dilimleme ve şekillendirme parametreleri (uygun bir tür dosyasında gruplar), tür dosyasındaki parametreler, BDT birimleri, dilimlere ayırma, tabaka kalınlığı, minimum yüzey açısı, sınır overcure, tarama overcure, doldurma katılaştırma, dilimleme eksenini, tarama tipi, doldurma ve 60/120 vektör boşluğu parametreleridir.
- **Skala Faktörü (SLA-500) :** Bu faktör dilimleme işleminden önce STL dosyasının büyüklüğünü değiştirir. Tanımlı değer : 1 (büyültme yok), çevrim aralığı : 0.001-50
- **Dilim Argument Dosyaları (SLA-250) :** Bu dilimleme parametrelerini uygun bir parametre dosyasında (.ARG DOS' da, UII Unix' de) gruplar.
- **Parça Kaydırmaları :** Parçayı şekillendirme platformuna yerleştirmek için kullanılır. Kaydırmalar x, y, z yönlerinde parçaya uygulanır.

Bundan sonraki parametreler SLA-190' da yoktur.

- **Dalma Sonu Beklemesi (PD- Postdip Delay) :** Asansörün derin dalma (deep dip) pozisyonunda durma zamanının saniye olarak değeridir. Yüksek viskoziteli reçineler ve/veya düz alanı büyük parçalarda uzun PD gereklidir. Tanımlı değer : 4 sn, çevrim aralığı : 1-99 sn.
- **Z Beklemesi (ZW) :** Asansörün önceki lazer çizmeye kadar durmasının seviye olarak değeridir. Bu zaman reçine yüzeyinin dinlenmesi için verilir, reçine viskozitesine ve yüzey gerilmesine bağlıdır. Tanımlı değer : 30 sn, çevrim aralığı : 0-999 sn.
- **Z İvmesi ve Hızı (ZA, ZV) :** Asansörün şekillendirme çevriminde hareketini kontrol eder. Parçanın kırılabilir kısımlarında bu değerın düşürülmesi gerekir. Tanımlı değer : 0.20, 0.20, çevrim aralığı : 0.05-1.00 (her ikisi için).
- **Süpürme Sayısı (NS) :** Kaplayıcı bıçağın süpürme sayısıdır. Toplam akışkan dinamik etkilerinden kaçınmak için (parçanın ön kenarlarına yakın yerlerde) değişik değerler tavsiye edilir. Tanımlı değer : 1, çevrim aralığı : 1-7 süpürme.
- **Süpürme Periyodu (P_n , $n=1....7$ için) :** Kaplayıcı bıçağın kabın uzunluğu boyunca hareketin saniye olarak değeridir. Tanımlı değer : 5 sn, çevrim aralığı : 3-30 sn.
- **Parça-Kaplama Bıçak Boşluğu (G_n , $n=1....7$ için) :** Süpürmedeki bıçak temizliğini tanımlar. Tanımlı değer : %100 (parça ve bıçak arası boşluk tabaka kalınlığıdır.), çevrim aralığı : %(100,999).
- **Kaplama Türleri (SLA-500) :** Kaplama parametrelerinin uygun bir kaplama türü dosyasında (.RSC) gruplanmasını sağlar.

- **Katılaştırma (OC- Overcure SLA-250)** : Sınır yada tarama vektörlerinin katılma derinliklerini kontrol eder.

Gerçek katılma derinliği = tabaka derinliği + OC

Tanımlı değer : reçine yada vektör tipine bağlı,

Çevrim aralığı : negatif tabaka kalınlığı - 0.50 mm.

- **Mutlak Katılma Derinliği (CD)** : Yukarı ve/veya aşağı yüz skin doldurma vektörlerinin katılma derinliklerini kontrol eder.

Gerçek katılma derinliği = mutlak katılma derinliği

Tanımlı değer : reçine yada vektör tipine bağlı,

Çevrim aralığı : 0-1.0 mm.

- **Çevrimler** : Parçayı seçilmiş dikey bölgelere böler. Parametre değerlerini parça kalitelerini arttırmak için, çevrimden çevrime değiştirme ihtiyacını ortadan kaldırır.

- **Mini Skala** : X, y ve z mini skalaları, reçine çekmesinin ölçümü için kullanılır. Tanımlı değer : %0 (parça büyüklüğü değişmez), çevrim aralığı : %(-5.000; +5.000).

- **Kopya Sayısı** : Kullanıcıya kaba sığacak seçilmiş parçaların maksimum sayısını verir. Boşluk kullanıcı tarafından ve otomatik alınır.

- **Reçine Verisi** : Reçine veri dosyaları reçine türü tercihini içerir.

4.4 FİRMALARA GÖRE YAZILIMLAR

4.4.1 CUBITAL (SGC)

Cubital firması fiziksel olarak en büyük ve en karmaşık mekanik özelliklere sahip HPÜ makinasını yani Solider adlı sistemi üretmektedir. Bu sistemde, iş istasyonu ortamında çalışan DFE (Data Front End) adlı program kullanılmaktadır. DFE tasarımcıların üç

boyutlu dosyaları ile model üretim makinası arasındaki ara yüzeydir. DFE, 3D BDT dosyalarını okur ve kontrol eder. Gerekli görülen yerlerde düzeltmeler yapıp, dosya üretime hazırlanır. Giriş verisine geometrik sınırlamalar getirilmez ve çoğu BDT modeli özel işlemlere gerek duyulmadan üretime hazırlanabilir. DFE çoğu grafik tabanlı yazılımların özelliklerini içerir.

Cubital DFE V 2.0 çalışma akışı:

1. 3D veri dosyasını DFE' ye alır.
2. Veri dosyasını CFL (Cubital Facet List) formatına çevirir.
3. Gereksiz yer kaplamayı önlemek için dosya büyüklüğü küçültülür.
4. Tasarımın topoloji istenildiği şekilde değiştirilebilir.
5. Dosyada bulunan eksiklikler otomatik olarak düzeltilir.
6. Parçaların biraraya getirilerek bir bütününün oluşturulması.
7. Bir gerçek zaman dilimleme işlemi kullanılarak parçanın bir bütünün üretilmesi.

Eğer düzeltme geliştirme işlemleri gerekmiyorsa, işlem adımları 2' den 6' ya yapılabilir.

Kabül edilebilir. Dosya formatları :

1. I-DEAS 3D BDT dosyaları,
2. CAEDS 3D BDT dosyaları,
3. Pro-Engineering 3D BDT dosyaları,
4. VDA-FS V 1.0 ve 2.0,
5. STL dosyaları, ASCII veya ikili kod,
6. CFL dosyaları.

Tüm bu kabul edilebilir formatlar otomatik olarak CFL formatına çevrilirler. Bu dosya ASCII veya ikili kod olarak kaydedilirler. CFL dosyaları, parçanın çok yüzlü elemanlarla gösterimidir. Üçgen elemanlarla sınırlandırılmamıştır. Bu dosyalar geometrik olmayan veri alanları içerir ve aşağıdaki özelliklere sahiptir.

1. Kullanıcı tanımlayıcı bir bilgi başlığı,
2. Parça üzerinde köşe noktalarının numaraları ve yüzey numaraları gibi bilgiler,
3. Gereksiz nokta bilgisi yok. Dosya büyüklüğü küçültülmüştür.
4. Görsel sayısız köşegen,
5. İçbükey ve dışbükey çokgenler.

Bir CFL dosya formatı aşağıdaki gibidir.

! ile başlayan satırlar açıklama satırlarıdır.

HEADER

name = "Birim küp"

unit = MM

END

POINTS

<i>! seq#</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>1</i>	<i>1.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>
<i>2</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>0.0</i>
<i>3</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>	<i>0.0</i>
<i>4</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>
<i>5</i>	<i>1.0</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>
<i>6</i>	<i>1.1</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>
<i>7</i>	<i>0.0</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>

END

FACETS

! # of holes

0 0 4 0 1 2 3

1 0 4 0 4 5 1

2 0 4 1 5 6 2

3 0 4 2 6 7 3

4 0 4 3 7 4 0

5 0 4 4 7 6 5

! delikler olan bir yüz örneği : İlk rakam yüz numarasını göstermektedir.

!17 2 4 1 2 3 4 yüz (# 17) iki adet dörtgen deliğe sahip.

END

4.4.2 DTM (SLS)

STL ve IGES formattaki modeller kabul edilir. DTM firmasının yazılımında, işleme parametrelerine ait farklı gruplar, malzeme tipine bağlı olarak ekranda görüntülenebilir. Kaplama, besleme silindirleri tarafından toz halindeki malzemenin sonraki tabaka için beslemesi ile gerçekleştirir. Parçalar kısmen, kap içerisinde tozlar yardımıyla desteklenir. Böylece hapsolmuş hacimle dolayısıyla yeni kaplama parametrelerine ihtiyaç duyulmaz. Yazılım, platform üzerindeki parçanın üretilmeden önce gösterilmesine olanak tanır.

4.4.3 HELISYS (LOM)

Windows altında çalışan bir program kullanılır. Bir PC parça işlenmesi sırasında, işlemin takibi için kullanılır. Dinamik bir yükseklik kontrolü, otomatik olarak yerleştirilen kağıdın her tabakasının kalınlığını ölçer. Çünkü bir roludaki bir çok sarılı kağıttan farklı kalınlıklarda olanlar çıkabilir.

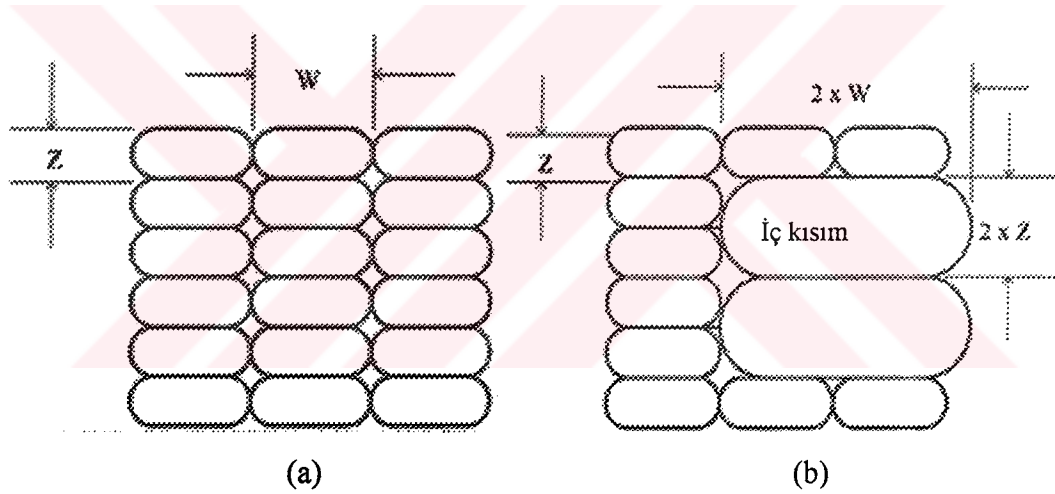
Veri girişi yalnız STL dosyalarıdır. Program, parçanın işleme platformunda kaydırılmasına olanak tanır, parça büyüklüğünü gösterir ve otomatik çoklu parça oluşturma olanağı vardır. 15 malzemeye ait özel parametrelerinin hepsi kullanılabilir,

kağıt rulodaki yapışkanı etken hale getiren ısıtıcı kontrol parametreleri içerir. Parça bittiğinde kağıdın kesilmesi işlemlerini içeren parametre grubunu içerir.

4.4.4 STRATASYS (FDM)

3D Modeller sisteminde Unix tabanlı program kullanılır. Program CAD/CAM yazılımının bir alt bölümünü kullanır. Dilimleme için program, CAMAX CAD/CAM yazılımı ile entegre edilmiştir.

Stratasys' in QuickSlice 2.0 programında eski versiyonları olan 1.3 ve 1.4' e göre büyük değişiklikler yapılmıştır (Şekil 4.9). İç bölgeler uzun ve geniş yollar kullanılarak doldurulurken, dış yüzeyler istenilen incelikte düzgün bir şekilde oluşturulabilir.



Şekil 4.9 FDM yazılım gelişimi

a)- QS 1.3 ve 1.4 işleme yöntemi b)- QS 2.0 hızlı işleme yöntemi

- 3D Modeller bir NURBS tabanlı yüzey modelleyici içerir.
- Tek prototip ve tasarım için kullanılır.
- Tasarımlara tanımlamalar yapma olanağı sağlar.
- İhtiyaç duyulan tüm destekleri ekleyebilme yeteneğine sahiptir.

Tasarım yazılımı yetenekleri, 3D NURBS yüzeylere yada basit iki boyutlu şekillere izin verir. Sistem noktalar, çizgiler, yaylar ve Spline eğrilerini kullanarak tasarım

modeli yapma veya çoğaltma işlemini sağlar. Yardımcı üç farklı tip veya beş farklı serbest formda yüzeye imkan tanır. Programın düzeltilmiş yüzey özellikleri hızlı prototip oluşturmaya izin verir. Renk gölgeleme ve katı modelleme gibi kolaylıklara imkan tanır. Tasarım yeterliliğine ilave olarak, BDT girişlerini IGES olarak kabul eder. Tel kafes, yüzey veya katı model BDT verisi IGES' e çevrilebilir. Gerekli duyulan değişiklikler yapılabilir. Destekler gerekli ise grafik olarak eklenebilir. 3D Modeller IGES yolu ile sayılaştırılmış veriyi kabul eder. Sayılaştırılmış veri prob, lazer tarama, CAT tarama gibi işlemlerle elde edilebilir.

4.4.5 Yazılımların Geleceği

HPÜ sitemlerinin yazılımları gelecekte, daha iyi ve yoğun grafik etkileşimli, kullanıcıya arkadaş yazılımlar olacağı düşünülmektedir. Bunun yanında kullanıcı, ekrandaki bir parça grubundan bir parçanın seçilen üç boyutlu resmin, direk bilgisayar tarafından destekleri ve optimum ayarları yapılabilecek. Gelecekte yazılımlar çok daha basit, kullanışlı ve gelişmiş olacaktır. Grafik ve otomasyon kelimeleri bu gelişmenin anahtar kelimeleridir.

BÖLÜM 5

KALIP İMALATINDA HPÜ SİSTEMLERİNİN KULLANILMASI

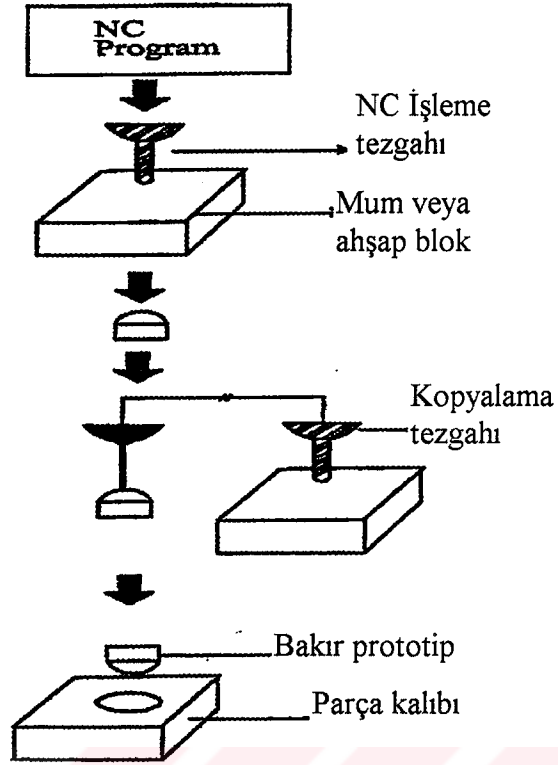
Artık bugünlerde çoğu parça CAD kullanılarak tasarlanmaktadır. Elektro-erozyon yöntemiyle kalıp üretimi için bir elektrod yapmak zaman alıcı bir işlemdir. NC programlama ile kalıp yapımı, parçanın karışık olması durumunda zaman alıcı bir işlemdir. HPÜ sistemleri kullanılarak parçanın erkek ve dişi kalıpları kolayca elde edilebilir. Klasik metotlarda gerekli zaman maliyete ihtiyaç duyulmaz[19].

HPÜ sistemleri ile elde edilen prototipler görsel, geometrik veya fonksiyonel testlerde kullanılabilirler. Bunların yanında en önemli kullanım şekli de, prototipten kalıba geçiştir. Genel olarak bu, kum kalıba döküm, hassas döküm veya silikon kalıplama gibi işlemlerle sağlanabilmektedir.

5.1 KLASİK KALIP İMALATI

5.1.1 Metot 1

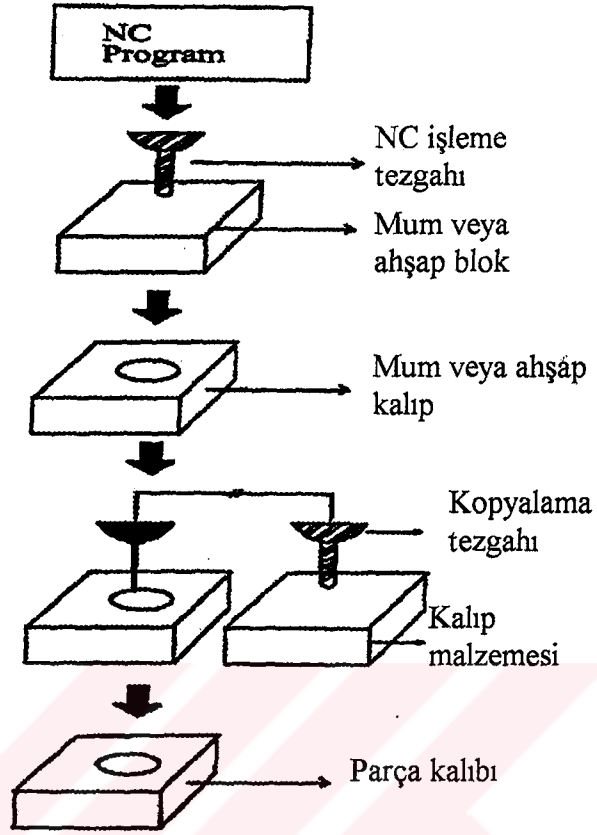
Önce ahşap veya mum parça oluşturulur. Bir kopyalama tezgahı kullanılarak parçanın bakır prototipi oluşturulur. Bu bakır parça daha sonra, verilen parçanın mastır kalıbı veya dişi kalıbın EDM (Electrodischarge Machining)' de yapılması için katot olarak kullanılır. Başlangıçta model parçadan daha küçük yapılır çünkü EDM işlemi genelde parçadan daha büyük boşluk oluşturur (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Klasik kalıp imalatı (Metot 1)

5.1.2 Metot 2

Parça büyükse, parçanın dişi kalıbının yüzey programları doğrudan CAM yazılımında yapılır. Elde edilen program, bir işleme merkezinde ahşap yada mumdan parçanın üretilmesinde kullanılır. Önce mastır kalıp yapılır, bir kopyalama tezgahı son kalıbı hazırlar (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Klasik kalıp imalatı (Metot 2)

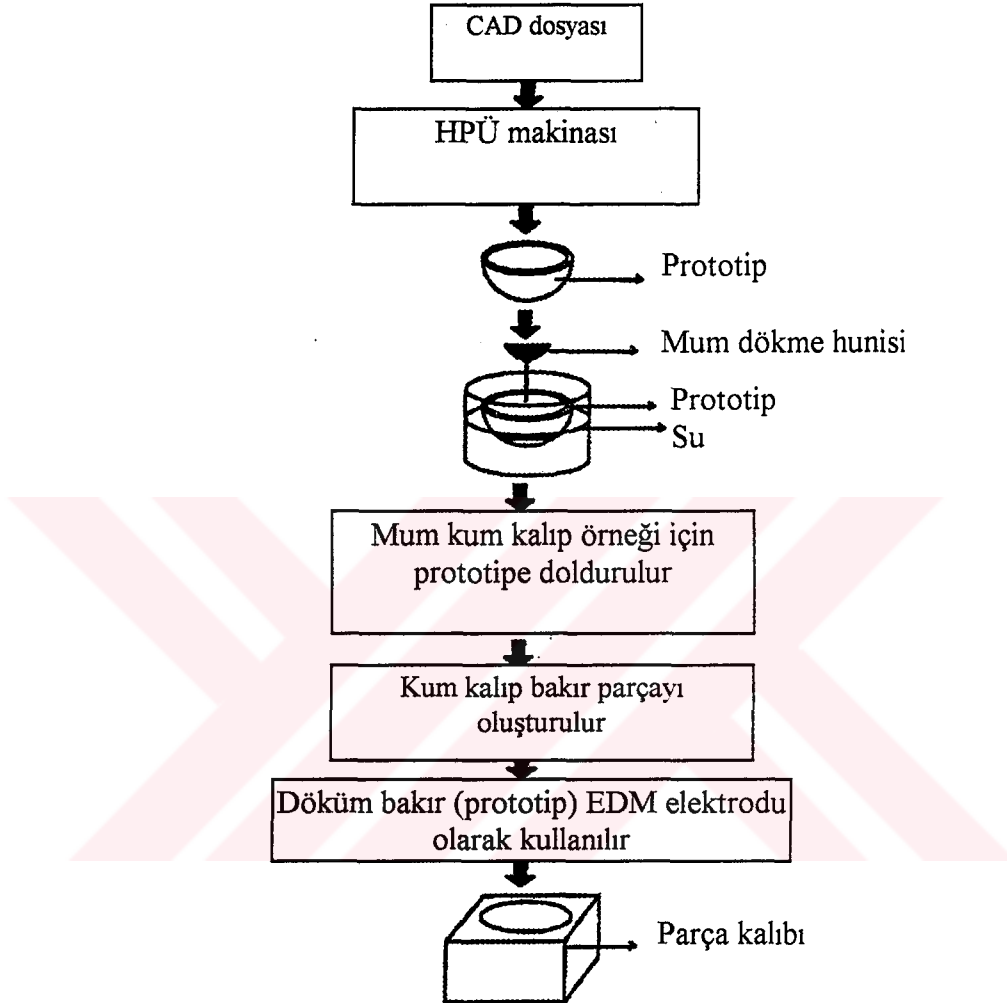
5.2 DAHA UYGUN YÖNTEMLER

5.2.1 Döküm Prototip

Küçük karmaşık parçalar için uygundur. Bu yöntem büyük parçalarda çok zaman alır. Çünkü EDM' deki malzeme taşınma oranı frezeden düşüktür. EDM ve frezelemede kopya prototip işleminde (EDM işlemi içeren) elde edilen yüzeyden daha iyi yüzeyler elde edilir. EDM işleminde düşük adım ve yüksek ark frekansında mükemmel yüzeyler elde edilir. Bu nedenle yüzey işlemleri için kullanılabilir.

HPÜ ile üretilen bazı parçalar düşük dayanıma sahiptir. Dolayısıyla, desteksiz olarak bir kum kalıp üretimi için numune olarak kullanılamazlar. Dişi parçanın dayanımı mum

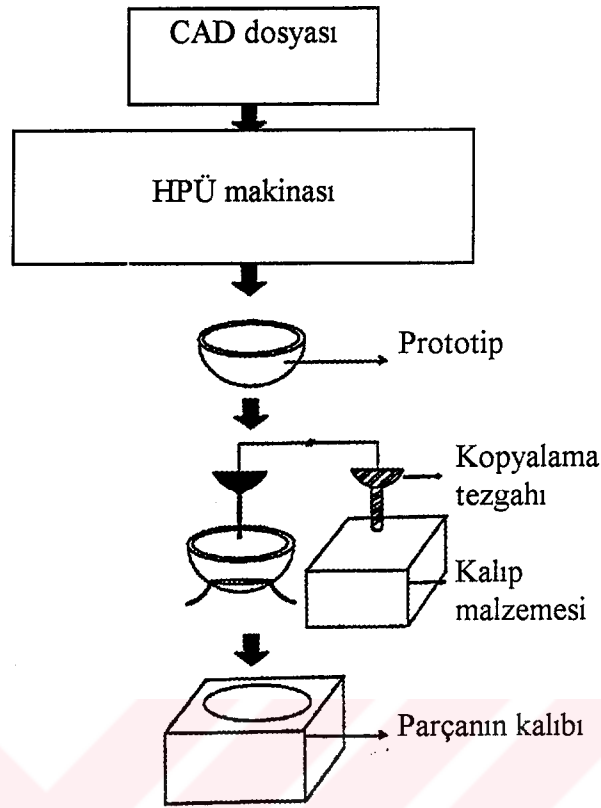
Yeterli dayanıma sahip dişi parça direk numune olarak kullanılabilir. Bu, bakır bir prototipin klasik döküm yöntemiyle üretimine yardım eder. Bu bakır prototip kalıp üretimi için EDM' de elektrot olarak kullanılabilir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Döküm prototip işlemi

5.2.2 Kopya Prototip İşlemi

CAD dosyasından HPÜ yöntemleri ile üretilen dişi kalıp, bir kopyalama tezgahı ile kalıp malzemesine kopyalanır. İşlem, Şekil 5.4' de gösterilmiştir. Bu yöntem büyük ve karmaşık parçalar için uygundur.



Şekil 5.4 Kopya prototip işlemi

5.2.3 Frezeleme ve EDM İşlemi

Kopyalama çok zaman alıcı bir işlemdir. Freze kullanılarak parçanın belirli yerleri alınıp EDM ile hızlı bir şekilde düzgün yüzeyler elde edilebilir.

Bir master kalıbın klasik metotlarla yapılması zaman alıcı, sıkıcı ve pahalı bir işlemdir. Döküm tekniğiyle daha önce bahsedilen yöntemlere benzer yüzeyler elde edilebilir.

BÖLÜM 6

HPÜ UYGULAMASI

Arçelik A.Ş Tuzla tesisleri AR&GE bölümü HPÜ laboratuvarında 29.4.1997 saat 5:11 PM' de SLA-250 (Şekil 6.1) makinasında, daha önce I-DEAS Master Series 4.0' da katı modeli oluşturulup STL dosyası ikili kod olarak kaydedilmiş olan bir pompa kanadının üretimi işlemine başlanılmıştır. Üretim işlemi 30.4.1997 saat 12:04 PM' de tamamlanmıştır.

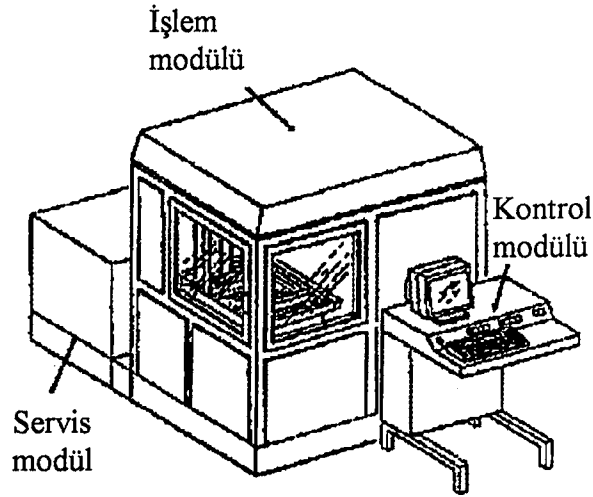
Bu üretimle ilgili olarak, seçilen malzeme, parçanın eksen takımına uygun yerleştirilmesi ve z ekseninin belirlenmesi , işleme parametreleri ile işleme süreleri aşağıda verilmiştir.

6.1 DOSYA

Parça dosyası.....blade.stl.....87984 byte (ikili kod)

Destek yapısı dosyası.....blade_s.stl.....40734 byte (ikili kod)

Bilgisayar ortamında destek yapılarının oluşturulması 3 sn. sürmüştür.



Şekil 6.1 SLA-250 HPÜ makinası

6.2 BDT

Parça 1758 üçgenle kaplanmıştır.

$$\text{Hacim} = 34253.1406 \text{ mm}^3$$

$$\text{Yüzey alanı} = 15698 \text{ mm}^2$$

Destek 813 üçgenle kaplanmıştır.

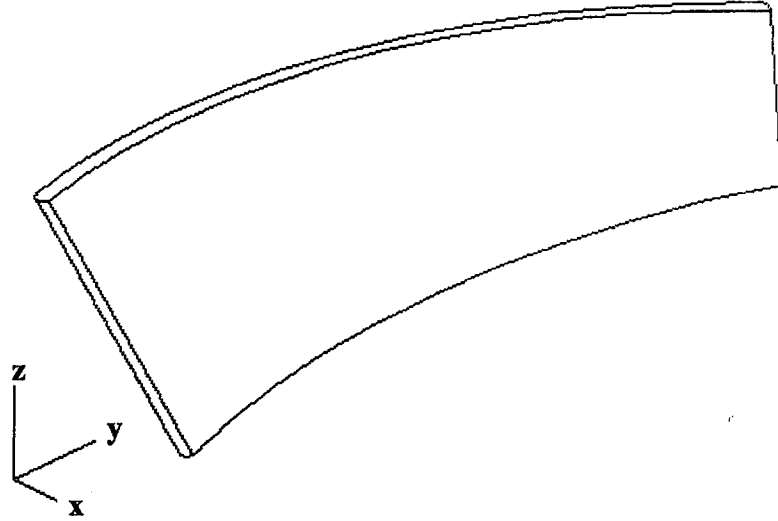
$$\text{Hacim} = 0 \text{ (çok ince bir yapıda olduğundan)}$$

$$\text{Yüzey alanı} = 5015.1 \text{ mm}^2$$

Facet deviation = 0.02 değeri I-DEAS' da dosya kaydedilirken tanımlanmıştır.

Parça Ölçüleri

Parça bir çok eğriliğe sahip olduğundan ölçüler, tasarlanan parçayı kapsayan en küçük dikdörtgenler prizmasına göre alınıp, minimum ve maksimum değerler aşağıda verilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Üretilen parçanın BDT resmi

Bilgisayar ortamında yerleştirme konumuna göre parçanın ölçüleri aşağıda verilmiştir.

Ölçülen minimum ve maksimum değerler

$$X_{\min} = 5.1231 \text{ mm} \quad X_{\max.} = 67.7572 \text{ mm}$$

$$Y_{\min} = 5.2795 \text{ mm} \quad Y_{\max.} = 140.1098 \text{ mm}$$

$$Z_{\min} = 10.0000 \text{ mm} \quad Z_{\max.} = 58.1216 \text{ mm}$$

6.3 Z EKSENİ SEÇİMİ

Z eksenini parçanın dilimleme eksenini ifade eder. Dolayısıyla maliyeti ve işleme süresini etkileyen önemli bir faktördür. Bu seçimde aşağıda sayılan maddeler önem taşır.

1. Parça yüksekliği (h) bir etkidir. Bu değer fazla olduğunda tabaka sayısı yani dilimleme sayısı da artar. Bunun artması ise tamamen işleme süresini etkiler. Çünkü, parçanın bilgisayar ortamında işlenmeye hazırlanması sırasında yapılan dilimleme işlemi uzar daha sonra da, imalat sırasında parça oluşturma süresi artar.
2. Parçada eş çalışacak kısımların belirlenip ona göre destek yapılarının oluşmayacağı bir eksen seçimi yapılmalıdır. Çünkü destek yapıları oluşan kısımlarda düzgünsüzlükler meydana gelir. Bu kısımlar daha sonra temizlenerek istenilen boyuta getirilebilir.
3. Dairesel kısımlar tam olarak elde edilebilmesi için eksenin z' ye paralel olmasına dikkat edilmelidir. Eğrisel kısımların z eksenine dik geldiği kısımlarda dilimleme

dolayısıyla, imalat sonrası parçanın bu kısımlarında daha önceden bahsedilmiş olan merdiven adımı etkisi görülür.

6.4 ÜRETİM PARAMETRELERİ

Parçanın SLA-250 sisteminde üretimi sırasında aşağıdaki parametre seçimleri yapılmıştır.

Parça için

Tabaka kalınlığı = 0.15 mm

Tarama (Hatch) = Kutu tipi (Box type)

Doldurma (Fill) = Hayır (No) (Parça geometrisi gerektirmiyor)

Sınır katılaştırma derinliği (Border Overcure) = 0.180 mm

Tarama katılaştırma derinliği (Hatch Overcure) = -0.02 mm

Destek için

Tabaka kalınlığı = 0.15 mm

Tarama (Hatch) = No (çok ince bir yapı olması nedeniyle)

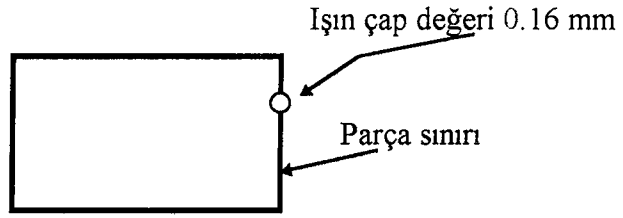
Doldurma (Fill) = No (Parça geometrisi gerektirmiyor)

Sınır katılaştırma derinliği (Border Overcure) = 0.185 mm

Tarama katılaştırma derinliği (Hatch Overcure) = 0.0

6.5 LAZER IŞIN KOMPANZASYONU (Beam Compansation)

Bu değer “0.16 mm” olarak seçilmiştir. Sıfır alınması durumunda, elde edilen parça dış boyutları BDT resmindeki değerden biraz büyük çıkacaktır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Lazer ışın kompanzasyonu

6.6 SÜPÜRME

Burada ifade edilen süreler her tabaka için geçerlidir. Bunların toplamı tarama süresi hariç parça için işleme zamanını verir.

z seviyesi bekleme zamanı = 25 sn.

Tek bir süpürme yapılmıştır.

Dalmadan önceki bekleme (Pre. Dip. Delay) = 10 sn.

Dalma sonu beklemesi (Post Delay) = 1 sn.

Süpürme süresi = 8 sn.

Bu işlemler için 321 tabakaya harcanan süre = 45 sn x 321 = 4.0125 saat.

6.7 MALZEME

Parçanın imalatında kullanılan malzeme, 3D Systems firmasının Cibatool SL 5170 adlı epoksi esaslı bir fotopolimerdir.

6.8 DİLİMLEME

Bu işlem bilgisayar ortamında önce destek yapılarının daha sonra da ana parçanın, verilen tabaka kalınlığında z eksenine dik paralel düzlemlere ayrılması işlemidir. Bu ayırma işleminden sonra vektör programları oluşturulur.

Bu işlemin gerçekleştirilmesi 75 sn. sürmüştür. Bu sürenin 1 sn' si destekler için, 64 sn' si ana parça için, kalan süre de diğer işlemler için harcanmıştır.

6.9 VERİ TRANSFERİ

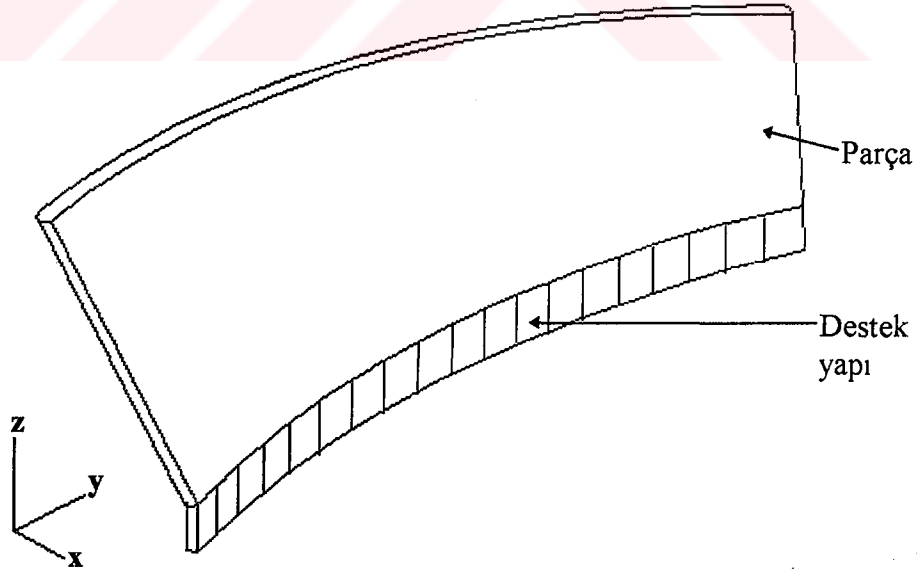
Yukarıdaki işlemlerin yapıldığı bilgisayardan FTP kullanılarak, dosya SLA-250 makinasının kontrol modülüne aktarılmıştır. Bu kısımda bilgisayar ortamında parça işlenmeden önce işleme simülasyonu izlenebilmektedir.

6.10 LAZER

İşlemede kullanılan lazer He-Cd lazeridir. Üretime başlamadan önce lazer kullanım süresi 5079.3 saat olarak tespit edilmiştir. Normal olarak bu tür bir lazerin kullanım ömrü 5000 saattir. Lazer aktif gücü; $P = 30 \text{ mW}$. Bu güç değerinin artırılması ile lazer tarama hızı artar.

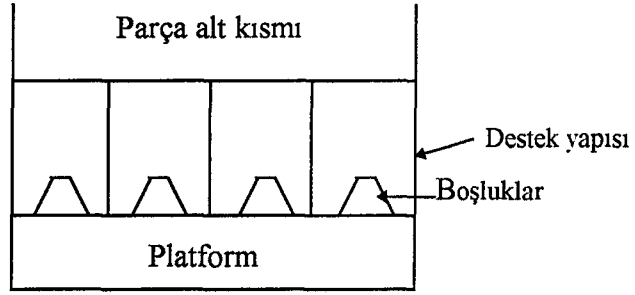
6.11 DESTEKLER

Bu yapılar daha önce bahsedilen *ağlar* tipinde, Bridgeworks yazılımı tarafından otomatik olarak, parçanın alt kısmı ile platform arasında oluşturuldu (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Parçanın desteklerle görünümü

Destek formu aşağıda verilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Destek formu

Bu yapılar platform ile parça arasındaki kısmı oluşturup, platforma yapışmış durumdadır. Bir miktar da parça içine geçmiştir. Bu şekilde parçaya daha iyi tutunabilmektedir. Boşluklar, daha kolay kırılabilmesi için bırakılır ve değişik formlarda olabilir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

HPÜ yöntemlerinin başında gelen Stereolitografi yöntemi ile üretilen parça, *işleme kalitesi, tanımlanabilen parametreler açısından, prototipin fonksiyonel testlere uygunluğu, işleme süreleri ve işleme maliyetleri* konularında değerlendirildi. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

7.1 İŞLEME KALİTESİ

Parça boyutsal, geometrik ve yüzey hassasiyeti yönleriyle irdelendi.

7.1.1 Boyutsal Kalite

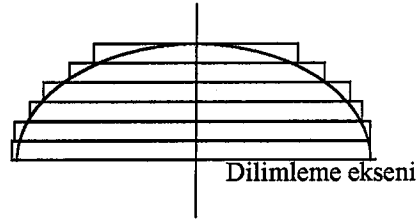
Üretilen parça, Mitutoyo CMM CHN1612 koordinat ölçme cihazında ölçülmüştür. Karşılaştırma ölçüleri olarak, BDT resminde uygulanan fark ölçüleri alınmıştır. Elde edilen sonuçların SLA-250 makinasının işleme toleransları içerisinde kaldığı görülmüştür. Daha önceki bölümlerde ifade edilen 0.2 mm' lik SLA-250 hassasiyet sağlanmıştır.

7.1.2 Geometrik Kalite

Parça bir çok karışık eğri ve yüzeylerden oluşmasına rağmen, tolerans sınırları içerisinde eğri ve yüzeyler elde edilmiştir. Bu, sistemin çalışma şekline bağlı büyük bir üstünlüktür. HPÜ teknolojileri kullanılarak, herhangi bir formdaki parça kolay bir şekilde hızlıca, ana geometriden büyük sapmalar olmadan üretilebilirler.

7.1.3 Yüzey Kalitesi

Parçanın yapılan görsel muayenesinde, *merdiven adımı etkisi* (Şekil 7.1) olarak daha önce tanımlanmış olan yüzey hatası gözlenmiştir. Bu tür bir etki, hemen hemen tüm HPÜ teknolojilerinde görülür ve dilimleme eksenine göre bazı eğrisel kısımlarda oluşur. Parçanın platforma yerleştirme konumuna göre, üst kısmında bu etki gözlenmiştir.



Şekil 7.1 Merdiven adımı etkisi

Önlem olarak, z eksenine seçimine dikkat edilmelidir. Daire formulu kısımların eksenleri, dilimleme eksenine olan z eksenine paralel getirilmeye çalışılmalıdır.

BDT modelde tanımlanan *yüzleme sapması* (facet deviation) değerine göre yüzey işleme hassasiyeti ayarlanabilir. Bu değer çalışmada, 0.02 seçilmiştir. Program otomatik olarak yüzleme işlemini yapar. Gerekli bazı kısımlar, daha fazla üçgen elemanla tanımlanarak istenilen yüzeye yaklaşılabılır.

Seçilen 0.02 değerinin biraz daha hassas seçilmesi durumunda, parçada daha iyi bir yüzey elde edilebileceği düşünülmüştür. Parçanın tamamen eğrisel kısımlardan oluşması bunu zorunlu kılmaktadır.

7.2 TANIMLANABİLEN PARAMETRELER

Sistemin tamamen otomatik olması tanımlanabilen parametre sayısını azaltmaktadır. Bu nedenle parametre seçiminde çok fazla seçenekler yoktur. İşleme kalitesi açısından, bazı parametrenin tecrübelerle bağlı olarak elde edilmiş olması, üretilen parçalarda istenilen sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

Parça eksenlerinin tanımlanması ve dilimleme ekseninin seçimi, işleme süresi ve maliyeti açısından en önemli faktördür. Tabaka kalınlığı makinada öngörülen değerler arasında ve genelde 0.15 mm seçilir. Lazer ışın kompanzasyonu 0.16 mm olarak seçilerek parçanın normal ölçülerinden daha büyük çıkması engellenmiştir. Sistemde, fotopolimer malzeme kullanılma zorunluluğu vardır. Lazer gücü, tecrübelerle elde edilmiş optimum bir değerdir. Bu değer, tarama hızı ile birebir bağlantılıdır. Parçada oluşturulan destek yapılarının uygun yerlerde oluşturulmasına önem gösterilmiştir.

7.3 FONKSİYONEL TESTLERE UYGUNLUK

HPÜ teknolojileri ile üretilen parçaların kullanılma amaçlarından en önemlisi, fonksiyonel prototip olarak kullanılmalıdır.

Stereolitografi yönteminde fotopolimer reçinelerin kullanılmasını zorunlu kılması, fonksiyonel prototip için döküm yöntemlerinin kullanılması gerektirir. Bu amaçla *silikon vakum kalıplama*, kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Mekanik özellikleri kötü fotopolimer prototipten bu yöntemle daha iyi mekanik özelliklere sahip termoplastik prototipe geçilebilir. Böylelikle parça üzerinde fonksiyonel testler uygulanabilir.

Diğer bir HPÜ sistemi olan FDM yönteminde direkt olarak termoplastik malzeme kullanılarak prototipler üretilir.

7.4 İŞLEME SÜRELERİ

Klasik prototip üretim metotları düşünüldüğünde, HPÜ'nde harcanan süreler çok düşüktür. Bu nedenle tasarım için harcanan maliyet ve sürelerde büyük düşmeler sağlanmıştır. Yeni tasarlanan herhangi bir parçanın prototipi saatlerle ifade edilebilecek bir sürede üretilip, boyutsal uygunluk, görsellik, tanıtım ve fonksiyonel test amaçlı kullanılabilir.

HPÜ sisteminde kısa süreler söz konusu olduğundan *iterasyon* yapma imkanı vardır. Prototipte tespit edilen hatalar veya eksik kısımlar nedeniyle BDT modelde düzeltmeler yapılarak parçanın tekrar prototipi üretilebilir.

Üretilen parçaya harcanan toplam süre ve dağılımı aşağıda verilmiştir.

1. İmalat öncesi hazırlama süresi yaklaşık 10 dk sürmüştür.
2. İmalat süresi yaklaşık 12 saat sürmüştür.
3. İmalat sonrası temizleme süresi
 - Platformda bekletme.....30 dk (Parça üzerindeki fazla malzemenin alınması için).
 - Parçayı platformdan alma
 - Temizleme (Alkolle yıkama + Destekleri alma)
 - Son ısıtma (Post-curing)
 - Zımparalama (Parçaya son şeklini verme).....işlemleri de 30 dk olmak üzere toplam yaklaşık olarak 1 saat sürmüştür.

7.5 SONUÇ PARÇANIN AĞIRLIĞI

Elde edilen parçanın desteklerle ağırlığı yaklaşık 45 gr. olarak tartılmıştır.. Desteklerin alınması ile net parça ağırlığı 42.440 gr olarak elde edilmiştir.

Bölüm 6.2’de, parçanın BDT resmi üzerinde hacim 34253.1406 mm^3 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca üretimde kullanılan SL 5170 reçinenin katı durumdaki yoğunluğu Tablo 2.3’ de 1.22 gr/cm^3 olarak verilmiştir. Bu iki değerden faydalanarak daha parça üretilmeden prototipin net ağırlığı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu hesap yapıldığında sonuç 41.789 gr parça ağırlığı bulunur. Bu değer gerçeğe çok yakındır.

7.6 MALİYETLER

HPÜ sistemlerinin tümü düşünüldüğünde herbirinin ilk yatırım, işletme ve bakım olmak üzere farklı maliyetleri söz konusudur.

Çalışmanın yapıldığı SL yönteminde ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. İşletme masrafları, kullanılan sönümlü bir kaynak olan lazer ve fotopolimer malzemelerin çok pahalı olması nedeniyle yüksektir. Bakım masrafları için üretici firmaya yıllık bir ücret ödenir.

SL yönteminde üretilen prototiplerde, desteklerden temizlenmiş net ağırlığı için, bazı firmalar tarafından yaklaşık 2.5 \$/gr birim fiyat uygulanır. Eğer parçanın silikon kalıbı yapılırsa fiyat biraz daha artar.



KAYNAKLAR

- [1] PFEIFER, T., EVERSHEIM, W.,** Manufacturing Excellence : The Competitive Edge, Chapman & Hall, (1994)
- [2] JACOPS, P. F.,** Rapid Prototyping & Manufacturing : Fundamental of StereoLithography, First Edition, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, (1992)
- [3] DOLENC, A.,** An Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing, Helsinki University of Technology, (1994)
- [4] RENAP, K., KRUTH, J., P.,** Recoating Issues in StereoLithography, MCB University Press, (1995)
- [5] JACOPS, P., F.,** StereoLithography and Other RP&M Technologies, ASME Press, New York, (1996)
- [6] BURNS, M.,** Automated Fabrication : Improving Productivity in Manufacturing, Prentice Hall, New Jersey, (1993)
- [7] ASHLEY, S.,** Prototyping with Advanced Tools, Journal of Mechanical Engineering, pp. 48-55, June (1994)
- [8] BURNS, M.,** Rapid Prototyping : System Selection & Implementation Guide, Managent Rountable, Massachusetts, (1991)
- [9] STRATASYS INC.,** FDM 1650 Rapid Prototyping System, (1996)
- [10] WEEREN, R. V., AGARWALA, M.,** Quality of Parts Processed by Fused Deposition, SFF, (1995)

- [11] **COMP, J.**, Stratasys FDM Speed and Accuracy, Stratasys Inc., (1996)
- [12] **BOWMAN, L.**, Helisys Laminated Object, UMAK Limited, Birmingham, (1996)
- [13] **KOCHAN, A.**, Paragon Uses LOM Technology to Cut Product Development Times, Assembly Automation, Vol. 14 No.2, pp.32-34, (1994)
- [14] **LEVI, H.**, Cubital's Solider 5600 System : A Second Generation, Accurate Rapid Prototyping System, (1996)
- [15] **WOOD, L.**, Rapid Automated Prototyping : An Introduction, Industrial Press Inc., New York, (1993)
- [16] **DOLENC, A.**, Rapid Prototyping from a Computer Scientist's Point of View, Helsinki University of Technology, (1995)
- [17] **FADEL, G., M., KIRSCHMAN, C.**, Accuracy Issues in CAD to RP Translations, MCB University Press, (1995)
- [18] **JAMIESON, R., HACKER, H.**, Direct Slicing of CAD Models for Rapid Prototyping, MCB University Press, (1995)
- [19] **GUPTA, P.**, Rapid Prototyping in Die Manufacturing, Iowa State University, (1994)

ÖZGEÇMİŞ

25.4.1973 tarihinde Çorum' un ALACA ilçesinde doğdu. 1990 yılında A.Ş.N.T lisesinden mezun oldu. 1994 yılında K.T.Ü. Makina Mühendisliği bölümünden mezun olarak İ.T.Ü Makina Fakültesi, İmalat Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Bir yıl İngilizce hazırlık eğitiminden sonra yüksek lisans derslerini almaya başladı. Bu sıralarda üç ay imalat üzerine bir kuruluştaki ve altı ay Darphane Genel Müdürlüğü' nde mühendis olarak çalıştı. Halen İ.T.Ü Makina Fakültesi, Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı' nda araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

