

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALIPLI İMALATTA HIZLI PROTOTİPLEME
TEKNOLOJİSİ**

Makina Müh. Mihrigül EKŞİ

106425

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Mehmet Emin YURCI

Prof. Mehmet Emin Yurci
Prof. Necdet Kızıltan
Yrd. Doç. Dr. Haydar Livatyalı

İSTANBUL, 2001

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Pratik Uygulamalar.....	2
1.2 Hızlı Prototiplemenin Temelleri.....	7
1.2.1 Girdi (Input).....	7
1.2.2 Uygulama Metodu.....	7
1.2.3 Malzeme.....	8
1.2.4 HP Uygulama Alanları.....	8
1.3 Hızlı Prototiplemenin Avantajları.....	8
1.3.2 Dolaysız faydalar.....	8
1.3.3 Ürün tasarımcılarına sağladığı faydalar.....	8
1.3.4 Takım tasarımcılarına ve imalat mühendislerine sağladığı faydalar.....	9
1.3.5 Dolaylı faydalar.....	9
1.4 Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	9
1.4.1 Sıvı bazlı sistemler.....	9
1.4.2 Katı bazlı sistemler.....	10
1.4.3 Toz bazlı sistemler.....	10
1.5 Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Gelişimi.....	10
2. HIZLI PROTOTİPLEME PROSESİ.....	12
2.1 Prosesin Esasları.....	12
2.2 Proses Zinciri.....	12
2.3 Üç Boyutlu (3D) Modelleme.....	13
2.4 Verininin Dönüştürülmesi.....	13
2.5 Kontrol ve Hazırlama.....	14
2.6 İşleme.....	14
2.7 Son İşleme.....	14
3. HIZLI PROTOTİP İMALAT TEKNOLOJİLERİ.....	16
3.1 Stereolitografi (SLA-Stereolithography Apparatus).....	17
3.1.1 İşlem.....	18

3.1.2	Yöntemin esasları.....	19
3.1.3	SLA sistemlerinde kullanılan fotopolimerler.....	28
3.1.4	Hata bulma testleri	30
3.1.5	Makina hassasiyeti	33
3.2	Ergitilmiş Malzeme Yığıma (FDM- Fused Deposition Modelling).....	35
3.2.1	FDM sisteminin çalışması.....	35
3.2.2	Lif malzemeleri	37
3.2.3	İşlem aşamaları.....	37
3.2.4	FDM parçaların kalitesi.....	38
3.2.5	FDM'de hız ve doğruluk.....	39
3.2.6	FDM teknolojisinin üstünlükleri	39
3.2.7	FDM'in uygulama örnekleri	40
3.3	Tabakalı Cisim İmalatı (LOM- Laminated Object Manufacturing).....	40
3.3.1	Sistemin çalışması	41
3.3.2	İşlem sırası.....	41
3.3.3	LOM uygulamaları.....	43
3.4	Seçici Lazer Sinterleme (SLS-Selective Lazer Sintering).....	44
3.4.1	SLS yönteminde kullanılan malzemeler.....	45
3.4.2	Sistemin çalışması	45
3.5	Katı Tabaka Kurutma Yöntemi (Solid Grounding curing-SGC)	46
3.5.1	Sistemin çalışma prensibi.....	47
3.5.2	SGC sistemi ile diğer HP sistemleri arası farklılıklar	49
3.5.3	Yöntemin Üstünlükleri	49
3.6	HP Sistemlerinde Kullanılan Lazerler.....	50
3.6.1	He-Cd Lazerler	50
3.6.2	CO ₂ Lazerler	51
3.6.3	Lazer Parametreleri	51
3.7	HP Teknolojilerin Seçimi.....	53
4.	HP SİSTEMLERİNDE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (BDT) İŞLEMLERİ	55
4.1	Katı Modelleme.....	55
4.2	Veri ihtiyaçları.....	58
4.3	BDT Sisteminde Veri Gösterimi	57
4.4	BDT Parametreleri	58
4.5	ParçaOryantasyonu.....	58
4.6	Destek Yapılar.....	60
4.6.1	Köşebentler.....	63
4.6.2	Özel olarak projelendirilmiş destekler	63
4.6.3	Kaburgalar	63
4.6.4	Ağlar.....	63
4.6.5	Kolonlar.....	63
5.	HP YAZILIMLARI.....	64
5.1	Verinin Hazırlanması	64
5.2	Veri Analizi	64
5.3	STL Dosya Hataları.....	66
5.4	Geçerli ve Geçersiz Model	68

5.5	Dosya Dönüştürücüleri	69
5.5.1	IGES formatı	69
5.5.2	HPGL formatı	69
5.5.3	CT formatı	70
5.5.4	SLC formatı	70
5.5.5	STL formatı	70
6.	HP SİSTEMLERİNİN İMALAT UYGULAMALARI	72
6.1	Plastik Kaplanmış Parçalar	72
6.1.1	Silikon kalıplama ile vakum döküm	72
6.1.2	Metal Spreyleme	74
6.2	Döküm	74
6.2.1	Kum kalıba döküm	75
6.2.2	Hassas döküm	75
7.	HP SİSTEMLERİNİN ENDÜSTRİDEKİ YERİ	76
7.1	Uçak endüstrisindeki yeri	76
7.2	Otomotiv endüstrisindeki yeri	76
7.3	Biyomedikal endüstrisindeki yeri	78
8.	HIZLI PROTOTİPLEME UYGULAMALARI	81
8.1	Stereolitografi Uygulaması	81
8.2	Silikon Kalıplama Uygulaması	85
8.3	FDM Uygulaması	90
9.	SONUÇLAR	94
	KAYNAKLAR	98
	EKLER	100
Ek 1	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 3500	100
Ek 2	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4400	101
Ek 3	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4500	102
Ek 4	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4512	103
Ek 5	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4601	104
Ek 6	Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4640	105
Ek 7	SLA prototipinin CAD tasarımı	106
Ek 8	Mastar model olarak kullanılan prototipinin CAD tasarımı	108
Ek 9	FDM prototipinin CAD tasarımı	112
	ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGE LİSTESİ

<i>V_s</i>	Lazer tarama hızı
<i>C_d</i>	Katılma derinliği
<i>D_p</i>	Penetrasyon derinliği
<i>PL</i>	Lazer çıkış yönü
<i>W_o</i>	Lazer ışın yarıçapı
<i>E_c, E_{max}, E_{min}</i>	Birim alana etkiyen kritik, maksimum ve minimum optik enerji
<i>r_{kr}</i>	Kritik daire yarıçapı



KISALTMA LİSTESİ

BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CSG	Constructive Solid Geometries
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Computer Numerical Control
CT	Computer Tomography
FDM	Fused Deposition Modelling
HPGL	Hewlett Packard Graphics Language
HPI	Hızlı Prototip İmalatı
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
LAN	Local Area Network
LOM	Laminated Object Manufacturing
PCA	Post Curing Apparatus
RPM	Rapid Prototyping and Manufacturing
SGC	Solid Ground Curing
SL	Stereolithography
SLA	Stereolithography Apparatus
SLC	Stereolithography Contour
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography File

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Türbin kanadının HP modeli	1
Şekil 1.2	Kumlanmış ve parlatılmış türbin kanadı prototopi	1
Şekil 1.3	Motor bloğunun prototopi	3
Şekil 1.4	HP ile imal edilmiş otomobil manifoldu	4
Şekil 1.5	Türbin kanadının kalıp kutusu ve reçineden yapılmış eşi	6
Şekil 1.6	Alüminyum türbin kanadının fonksiyonel test modeli	6
Şekil 2.1	Üç temel işlemin şematik resmi	12
Şekil 3.1	SLA-500 makinası	16
Şekil 3.2	SLA yönteminin çalışma prensibi	18
Şekil 3.3	Üçgen kafeslerle tanımlanmış parfüm şişesi	20
Şekil 3.4	SLA' da imal edilmiş parça ve destekleyicileri	20
Şekil 3.5	Farklı lazer güçleri için parça imalat süreleri	22
Şekil 3.6	Farklı tarama aralıkları için parça imalat süreleri	22
Şekil 3.7	Kritik daire yarıçapı	24
Şekil 3.8	XB 5081 -1 reçinesi için ısıl işlem sıcaklık değerleri	28
Şekil 3.9	Test numunelerin üstten görünüşleri	31
Şekil 3.10	Lineer boyutlara göre büzülme oranları	32
Şekil 3.11	Test numunesi boyutları	32
Şekil 3.12	Kabarma eğrisi	33
Şekil 3.13	Makina hassasiyet belirlemede kullanılan test parçası	34
Şekil 3.14	SLA standart sapma oranları	35
Şekil 3.15	FDM 2000 makinası	35
Şekil 3.16	FDM' in çalışma prensibi	36
Şekil 3.17	FDM kafası elemanları	37
Şekil 3.18	FDM parçalarda iç hatalar	39
Şekil 3.19	LOM sisteminin şematik resmi	40
Şekil 3.20	SLS yönteminin şematik resmi	44
Şekil 3.21	SLS yönteminin şematik resmi	46
Şekil 3.22	DTM makinası	46
Şekil 3.23	SGC sisteminin şematik görünümü	48
Şekil 3.24	Tipik bir He-Cd lazer tüpü kesit görünüşü	50
Şekil 3.25	Reçine çalışma eğrisi	52

Şekil 3.26	HP seçim sisteminin temel yapısı.....	54
Şekil 3.27	HP sistemi akış şeması.....	54
Şekil 4.1	Üçgen yüzey elemanları ile tanımlanmış küp elemanı 1.....	56
Şekil 4.2	Kapalı modelde dilimleme örnekleri.....	56
Şekil 4.3	Yüzey normalleri.....	57
Şekil 4.4	I-DEAS yüzleme metodu.....	58
Şekil 4.5	Merdiven adımı etkisi.....	59
Şekil 4.6	Hapsolmuş hacim örneği.....	60
Şekil 4.7	Farklı HP sistemlerinin çalışma hacimleri.....	60
Şekil 4.8	Parça ve destek yapının şematik resmi.....	61
Şekil 4.9	Katı modelden taranmış destek yapıya geçiş.....	62
Şekil 4.10	Farklı destekleme türleri.....	62
Şekil 4.11	Destek yapıların şematik resmi.....	63
Şekil 5.1	Yarım dairelerin üçgen yüzey elemanlarına bölünmesi.....	65
Şekil 5.2	Dilimlenmiş distribütör kapağı.....	66
Şekil 5.3	Tipik bir STL dosyası.....	66
Şekil 5.4	Doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu.....	66
Şekil 5.5	Kayıp yüzeylerden oluşan boşluklar.....	67
Şekil 5.6	Üst üste binmiş yüzeyler.....	68
Şekil 5.7	Geçerli dönüştürülmüş model örnekleri.....	68
Şekil 5.8	Geçersiz dönüştürülmüş model.....	69
Şekil 5.9	Bir üçgen yüzey elemanının köşe noktaları ve doğru normali.....	71
Şekil 6.1	Silikon kalıplama aşamaları.....	73
Şekil 6.2	Metal ark spreyci sistemi.....	74
Şekil 7.1	SL yöntemi ile imal edilmiş otomobil starter.....	77
Şekil 7.2	Otomobil manifoldu.....	78
Şekil 7.3	Diz kapağı protezi.....	79
Şekil 7.4	Omuz prototipi.....	79
Şekil 7.5	İki parçalı omuz başları.....	80
Şekil 8.1	SLA- 250 makinası.....	81
Şekil 8.2	İmal edilen parçanın katı modeli ve destekler ile birlikte STL formatı.....	82
Şekil 8.3	SLA-250 makinasında parça imalatının gerçekleştirilmesi.....	84
Şekil 8.4	SL yöntemi ile imal edilmiş çamaşır makinası düğmesi prototipi.....	86

Şekil 8.5	Parçanın yolluk ve havalandırma çubukları ile birlikte havuz içindeki görünümü.....	86
Şekil 8.6	Kalıp havuzuna silikon dökülürken.....	88
Şekil 8.7	Silikon kalıp.....	88
Şekil 8.8	Silikon kalıbın ayrılmasından sonraki görünümü.....	88
Şekil 8.9	Vakum makinasının şematik resmi.....	89
Şekil 8.10	Döküm parça ve prototipi.....	90
Şekil 8.11	Parçanın CAD tasarımı.....	92
Şekil 8.12	Parçanın STL formatı	93
Şekil 8.13	Parça ve destekleyiciler	93
Şekil 8.14	İmal edilen FDM parçası	93
Şekil 9.1	Merdiven adımı etkisi.....	94
Şekil 9.2	Döküm parçası üzerinde tespit edilen hata	96



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	HP sistem satışları	11
Çizelge 2.1	Farklı HP prosesleri için bitirme işlemleri	15
Çizelge 3.1	SLA makinalarının karakteristikleri	17
Çizelge 3.2	Vinileter esaslı bazı fotopolimerlerin özellikleri	29
Çizelge 3.3	Sıvı ve katı durumdaki reçinelerin özellikleri	30
Çizelge 3.4	2" üzerinden % büzülme oranları	31
Çizelge 3.5	Kabarma oranları	33
Çizelge 3.6	Bazı FDM liflerinin özellikleri	37
Çizelge 3.7	LOM sistemine ait parametreler	43
Çizelge 3.8	Bazı SLS malzemelerinin özellikleri	45
Çizelge 3.9	Solider 4600 ve Solider 5600 makinaların özellikleri	47
Çizelge 3.10	SGC sisteminde kullanılan polimer malzemelerin özellikleri	47
Çizelge 8.1	Silikon dökümde kullanılan poliüretan karışımlarının özellikleri	89
Çizelge 8.2	Stratasys malzemeleri	91
Çizelge 8.3	FDM 2000 System özellikleri	91
Çizelge 9.1	Bazı HPİ teknolojilerin karşılaştırılması	95

ÖNSÖZ

Hızlı Prototipleme ve İmalatı 1985 yıllarından sonra olgunlaşmış, dünya çapında birçok ödül almış ve halen gelişmekte olan bir teknolojidir. Günümüzde, anılan yöntem artık bir mühendislik metodu olmuştur. Bana bu yeni teknoloji ile tanışma fırsatını sağlayan ve çalışmalarımda bana sonsuz destek veren Sayın Hocam Prof. Mehmet Emin YURCİ' ye, uygulama aşamasında ilgi ve yardımlarını eksik etmeyen Arçelik Firması, Hızlı Prototipleme ve İmalat Sistemleri Bölümü mühendislerinden Sayın Mehmet SALAR ' a ve tüm çalışanlarına, Infotron Firması' ndan Burak PEKCAN' a ve Deniz ÖZDEMİR' e, Genpaş Firması' ndan Atilla UZMAN' a ve Erkam ÖZKÖK' e, tüm mesai arkadaşlarıma ve maddi manevi yardımlarını esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Hızlı Prototipleme (HP) Teknolojisi, bilgisayardaki grafik modelden doğrudan katı nesnelerin elde edildiği bir imalat yöntemidir. 1987 yılından sonra gelişen bu teknolojiye 3D Systems Firması öncülük etmiştir. Yöntemin esası, parçanın üç boyutlu tasarımı (CAD) ile başlamaktadır. Tasarımı yapılan parça, bilgisayar ortamında dilimlenerek tanımlanmakta ve bu veri, hızlı prototipleme makinesinin güç ünitesine aktarılmaktadır. Makine, prototipi her katmanının bir öncekine bağlanmasıyla oluşturmakta ve tasarlanan model tamamlanıncaya kadar bu işlem devam etmektedir.

Hızlı Prototipleme teknolojisinin günümüz endüstrisindeki yeri göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. Yapılan tasarımlarda muhtemel tasarım hatalarının tespit edilmesi için modelin monitör üzerinde gözlemlenmesi veya imal edilecek parçaların mekanik dayanımlarının önceden tayin edilmesi için birtakım bilgisayar analizlerin matematiksel olarak yapılması, uygun parçaların elde edilmesi için her zaman yeterli olamayabilmektedir. Ancak, HP parçaların çok kısa sürede ve tasarıma birebir uyumlu imal edilebilirliği ve yapılan incelemeler sonucu parçada herhangi bir hata tespit edildiğinde CAD tasarıma dönülüp hatanın düzeltilebilirliği ile HP sistemleri, en çok tercih edilen prototip imalatı yöntemleri arasında yerini almıştır.

Yukarıda anılan faktörlerden dolayı, bu çalışmada HP teknolojileri üzerinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Endüstride en çok uygulanan HP yöntemleri detaylı bir şekilde tanıtılmış ve bu yöntemlerden Stereolitografi (SL) ve Ergiyik Malzeme Birikimi (Fused Deposition Modelling-FDM) sistemleri, işlem esasları ve parametreleri açısından incelenmiş, kıyaslanmış ve uygulamalarla desteklenmiştir. HP modelleri direkt endüstriyel parça veya fonksiyonel test model (FTM) olarak kullanılabilir. Nitekim bu çalışmada da, FTM uygulamasına örnek teşkil etmek amaçlı, SL yöntemi ile imal edilmiş olan bir prototip, silikon kalıpta master model olarak kullanılmış ve poliüretan esaslı döküm parça imal edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmada amaçlanan unsurlar sırasıyla, Hızlı Prototipleme ve İmalatı teknolojilerini incelemek, kıyaslamak, yöntemin parça imalatına sağladığı avantajları vurgulamak ve anılan teknolojinin kalıplama proseslerindeki yerini ve önemini uygulamalarla desteklemek süretiyle göstermek olmuştur.

Anahtar kelimeler: Hızlı prototipleme, Stereolitografi, Ergiyik Malzeme Yığıma, Vakum altında silikon kalıplama.

ABSTRACT

Rapid Prototyping Technology is a manufacturing method by which physical parts are built directly from computer generated representation of the part geometry. 3D Systems Inc. brought this new technology to the market in 1987. The principle of this method starts with three-dimensional computer aided design (CAD) model of the part. The computer software slices the designed model and then this data is transferred to the hardware of the RP machine. The machine uses this data to construct the model layer by layer, each layer being bonded to the previous one until the model is formed as a solid object.

The place of the rapid prototyping Technology in today's industry is very significant. Determining the probable design faults on the drafted models by investigating computer screen and making computational analyses are not always sufficient to obtain correct patterns. However, by means of this new technology, parts are manufactured in a very short time being devoted to the design. If any fault is determined on the prototype after the analysis, this fault can be easily corrected on CAD model. All these reasons make RP systems to have become the most preferable method among manufacturing process of prototypes.

For the factors mentioned above, in this study an investigation is made on RP technologies. One of the two most applied methods of RP systems, Stereolithography (SL) and Fused Deposition Modelling (FDM) are studied, compared and benchmarked by a few industrial applications. RP patterns are both used as industrial parts and functional test models (FTM). As an example for FTM, a prototype built by SL is used as master model in silicone mold and the polyurethane founded cast part is manufactured by vacuum casting method

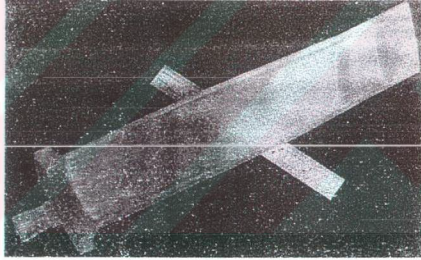
To sum up, the factors aimed in this study are to investigate and compare Rapid Prototyping and Manufacturing Technologies, to emphasise the advantages brought by for manufacturing industrial parts and to point out the place and the importance of this new method in moulding process.

Keywords: Rapid Prototyping, Stereolithography, Fused deposition modelling, Silicone casting under vacuum.

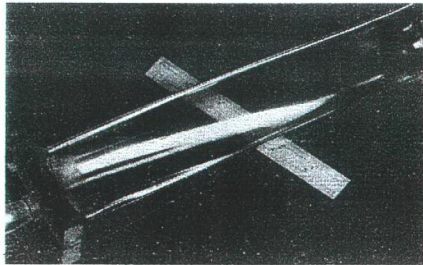
1. GİRİŞ

Özellikle sonuçları çok büyük yararlar sağlayan yenilik ve buluşlar, insanlar arasında daima ilgi çekmiş ve hayranlık uyandırmıştır. Bu çalışmada, henüz çok yeni bir imalat yöntemi olan Hızlı Prototipleme Teknolojisi ve uygulamaları incelenmiştir. Anılan teknoloji, bilgisayardaki grafik verilerden doğrudan fiziksel nesneye geçişi sağlamaktadır. Bu teknolojinin adı; Hızlı Prototipleme ve İmalatıdır -HPİ (Rapid Prototyping & Manufacturing-RP&M). İlk ismi Stereolitografi (SL) ya da diğer bir isimle üç boyutlu bilgisayar çıktısı almaz. 3D Systems (Valencia, CA) şirketi bu teknolojiye öncülük etmiştir (Kai ve Fai,1997).

Prototipleme yöntemi, aslında endüstrideki çeşitli imalat uygulamalarında uzun süredir kullanılmaktadır ancak gelişen teknoloji ile ismi hızlı prototipleme olmuştur. Şekil 1.1' de Stereolitografi cihazı ile elde edilmiş olan bir türbin kanadı prototipi görülmektedir. Şekil 1.2' de ise türbin kanadının kumlamaya ve parlatmaya tabi tutulmuş şekli görülmektedir. Şekil 1.1'deki ve Şekil 1.2' deki tüm işlemlerin tamamlanması iki haftadan daha az bir süre almıştır.



Şekil 1.1 Türbin kanadının HP modeli (Jacobs, 1992)



Şekil 1.2 Kumlanmış ve parlatılmış türbin kanadı prototipi (Jacobs, 1992)

1.1 Pratik Uygulamalar

HP, teknoloji olarak halen çok yenidir. Ancak sağladığı faydalar sayılamayacak kadar çoktur. Anılan teknoloji, imal edilmek istenen parçanın, imalatından önce görsellik, kalite kontrol, iterasyon ve optimizasyon gibi çeşitli açılardan analiz edilmesine imkan vermektedir.

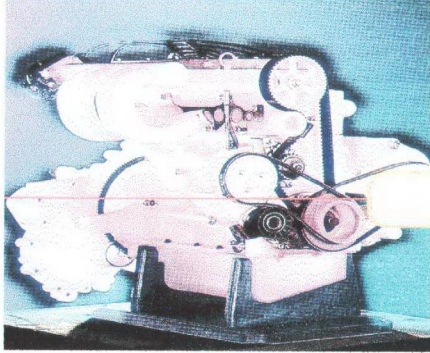
Görünüm

Geometrisi karmaşık olan bir parçanın CAD görüntüsünün okunmasında, okuyucu veya gözlemci ne kadar deneyimli olursa olsun gerçek parçanın tam olarak neye benzediğini hayal etmesi her zaman için mümkün olamamaktadır. Kötü delikler, karmaşık iç geçişler gözle canlandırması zor olan kısımlardır. Ancak prototip parçanın eldesi ile tüm bu detaylar rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bu sebeple, bir resim bir kelimeye değer sözü, bir prototip bin resme değer sözüyle değiştirilmiştir.

Örnek olarak; Chrysler Firması'nın motor bloğunun CAD modelinde görülemeyen bir hata, SLA-500 cihazı ile imal edilen edilen prototipi üzerinde görülmüş ve düzeltilmiştir. Yapılan hata; birinci ve ikinci silindirler arasında olması gereken boşluk ikinci ve üçüncü silindirler arasına verilmiştir. Bu yanlışlık prototipin incelenmesi ile rahatlıkla görülmüş ve düzeltilmiştir (Kai ve Fai, 1997).

Kalite kontrol

İmalat mühendislerin, tasarımcıların ve yöneticilerin en çok karşılaştıkları sorun; parça kalitesini yükseltmektir. İmalatçının kısa süreli teslimata zorlanması genellikle parça kalitesinin düşmesine yol açmaktadır. Klasik yöntemlerle yapılan prototiplemede, bir tasarımın hayata geçirilmesi, gerekenden daha fazla zaman ve iş gücü harcanmasına yol açmakta ve dolayısıyla, bu harcama da maliyete doğrudan yansımaktadır. Söz konusu maliyet artışlarından kaçmak için, yapılan prototip üzerinde belli başlı hataların düzeltilmesiyle, yapılmış olan prototipi bir an önce kabul ettirmeye yönelik çabalar görülmektedir. Nitekim daha önce verilmiş olan Chrysler'in motor bloğu örneğinde, hatanın prototip üzerinde görülmüş olması ve düzeltilmesi, daha sonra seri imalata geçilmesi birçok yönden maliyeti azaltmıştır. Şekil 1.3' de motor bloğunun prototipi görülmektedir.



Şekil 1.3 Motor bloğunun prototipi (3D Systems,1997)

Kalitenin artırılmasına yönelik talimatlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

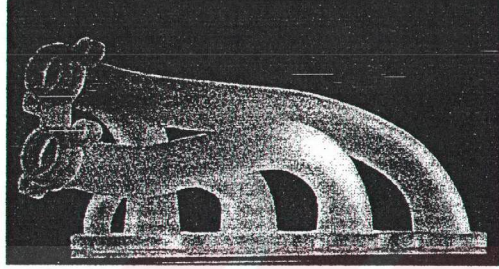
- Prototipin bilgisayar destekli tasarımı
- HPİ ile prototipinin oluşturulması
- HP model üzerindeki muhtemel dizayn hatalarının gözlemlenmesi
- Eğer hatalar var ise, CAD tasarım üzerinde düzeltmelere gidilmesi
- Yapılan düzeltmelerden sonra imal edilen prototipin kontrolü
- Prototip üzerinde fonksiyonel test modelinin (FTM) oluşturulması
- Fonksiyonel testlerin uygulanması
- Sonuçlar tatmin edici ise imalata başlanması

FTM, elde edilen prototipin herhangi bir imalat yönteminde kullanılmasıdır, örneğin prototipin kum kalıba dökümde veya silikon kalıpta master model olarak kullanılması ve istenilen malzemeden parça elde edilmesi, bir fonksiyonel test modeli işlemidir. Elde edilen parça üzerinde çeşitli analizlerin (mukavemet, eğme-çekme gibi) yapılmasıyla prototipin bir test modeli oluşturulmuş olmaktadır. Bu konuya daha sonra tekrar değinilecektir.

İterasyon

Yukarıda bahsi geçen sekiz madde ile kaliteyi geliştirme bölümünün, HPİ teknolojisinin önemli bileşenlerinden biri olduğu açıkça görülmektedir. Fakat daha önemlisi hızlı dizayn iterasyonunun yapılabilirliğidir.

Prototip geliştirme teknikleri, önceleri çok zaman alıcı ve pahalıya mal olmaktadır. HPİ teknolojisinin gelişmesiyle bir veya iki haftalık süre içinde birçok dizayn iterasyonlarını elde etmek mümkün olabilmektedir. Örneğin; Şekil 1.4’ te gösterilen bir otomobil motorunun manifoldu, HP tekniği ile bir kaç günde elde edilmiştir.



Şekil 1.4 HP yöntemi ile imal edilmiş otomobil manifoldu prototipi (Jacobs, 1992)

Sonuç olarak, kaliteyi geliştirmek amaçlı daha önceden bahsedilen sekiz maddedeki altıncı maddeye iterasyonu ilave etmek doğru olacaktır.

- Prototipin bilgisayar destekli tasarımı
- HPİ ile prototipinin oluşturulması
- HP model üzerindeki muhtemel dizayn hatalarının gözlemlenmesi
- Eğer hatalar var ise, CAD tasarım üzerinde düzeltmelere gidilmesi
- Yapılan düzeltmelerden sonra imal edilen prototipin kontrolü
- İterasyonlarla dizaynın geliştirilmesi
- Prototip üzerinde fonksiyonel test modelin oluşturulması
- Fonksiyonel testlerin uygulanması
- Sonuçlar tatmin edici ise imalata başlanması

Optimizasyon

İterasyonla birlikte, optimizasyon da pahalı ve zaman alıcı bir prosestir. İmal edilecek parçanın dizaynının tamamlanmasıyla, hiçbir akış problemi olmayan bir manifold elde ettikten sonra, aklımıza gelen ilk soru, parça üzerindeki bir sonraki işlemin ne olabileceğidir. Elde edilen sonuç ise, parça için fonksiyonel testin uygulanmasıdır. Eğer test model çalışırsa, işlem tamamlanmıştır. Sonuç itibarı ile bir roket bileşenini oluşturmak gibi ciddi bir çalışmada düzinelerce prototip elde etmek oldukça pahalı ve zaman alıcı olmaktadır. İlk prototipte, mühendislerin veya tasarımcıların doğru olan optimum noktayı yakalama şansları

çok azdır. Ancak, HP teknolojisi, prototiplere kısa sürede test modellerin ve analizlerin uygulanmasıyla optimum kalitede parça imalatına imkan vermektedir.

Sonuç olarak, kaliteyi arttırmak için yukarıda bahsi geçen sekiz madde şu şekilde düzenlenmektedir.

- Prototipin bilgisayar destekli tasarımı
- HPİ ile prototipinin oluşturulması
- HP model üzerindeki muhtemel dizayn hatalarının gözlemlenmesi
- Eğer hatalar var ise, CAD tasarım üzerinde düzeltmelere gidilmesi
- Yapılan düzeltmelerden sonra imal edilen prototipin kontrolü
- İterasyonlarla dizaynın geliştirilmesi
- Prototip üzerinde fonksiyonel test modelin oluşturulması
- Fonksiyonel testlerin uygulanması
- Sonuçlar tatmin edici ise imalata başlanması

İmalat

Görsellik, kontrol, iterasyon ve optimizasyon unsurları, herhangi bir imalat prosesi gerektirmeden SL kullanıcıları tarafından kabul edilmiş olmakta ve kullanılmaktadır. HP prosesinden imalata geçiş aşaması ise, uygun malzeme seçmek ve prototipi model veya kalıp olarak kullanmak suretiyle gerçekleştirilebilmektedir.

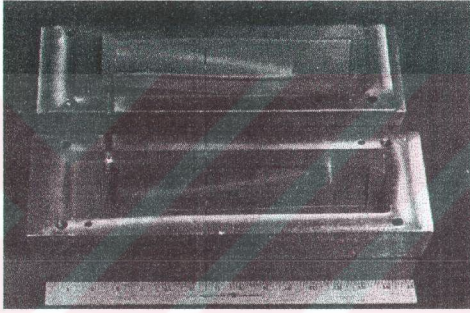
Optimize olmuş bir model oluşturduktan sonra, bir fonksiyonel test modeli (FTM) geliştirmek gerekmektedir. HPİ' den, FTM'ye geçiş için birçok teknik başarıyla uygulanmaktadır. Bu tekniklerden bazıları;

- Oda sıcaklığında silikon vulkanizasyonu
- Vakum döküm
- Blok döküm
- Sprey metal kalıpcılığı (TAFE)
- Reçine transferi ile kalıpcılık
- Kum kalıba döküm

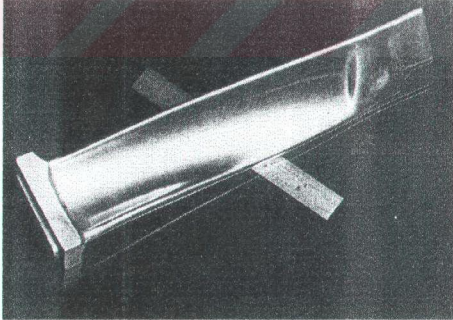
Anılan bu yöntemlerle ilgili detaylar ilerleyen konularda verilecektir. Tekniğin maliyet açısından uygun olması, prototip geometrisine ve şekline bağlı olmakta, malzeme tipinin

bilinmesi ise FTM için gereklidir. Unutulmamalıdır ki, bahsi geçen on maddeden dokuzu HPİ teknolojisi ile çok rahatlıkla uygulanmaktadır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de bahsedilen türbin kanadına geri dönülürse, imal edilen prototip geometrik açıdan doğru olduğu sürece, iterasyona ihtiyaç duyulmamaktadır..

Şekil 1.5’ de görülen kalıbın prototipi yapılmakta, ve bu kalıp kutusunu kullanarak reçineden yapılmış birçok model elde edilmektedir.. Bu reçine modeller daha sonra, hassas kabuk döküm yönteminde model olarak kullanılmakta ve alüminyumdan yapılmış türbin kanadı elde etmek mümkün olmaktadır (Şekil 1.6).



Şekil 1.5 Türbin kanadının kalıp kutusu ve reçineden yapılmış eşi



Şekil 1.6 Alüminyum türbin kanadının fonksiyonel test modeli (Jacobs, 1992)

1.2 Hızlı Prototiplemenin Temelleri

Kaive Fai' nın da (1996) belirttiği gibi birçok farklı hızlı prototipleme yöntemi için geçerli ortak özellikleri tek bir paydada göstermek mümkündür;

- Oluşturulacak katı hacimsel bölümü tanımlayan model, CAD/CAM sisteminde tasarlanmaktadır. Veri (data), modelin hem içini hem dışını hem de sınırlarını içermektedir.
- Katı veya yüzey model, 3D Systems tarafından oluşturulan STL dosyalarına dönüştürülmektedir. STL formatı, modelin yüzeyini üçgen yüzey elemanlarına (fasetlere) ayırmaktadır. Yüksek kavisli yüzeylerde birçok üçgen bulunmaktadır dolayısıyla tasarlanan parçanın kavisli bölümleri için STL dosyaları çok geniş olabilmektedir.
- STL dosyasındaki bilgisayar analizi, imal edilecek modeli belirtmekte ve modeli birçok fasete bölmektedir. Bölünmüş alanlar, malzemenin katman katman birleştirilmesi ile yeniden oluşturulmakta ve üç boyutlu modeli oluşturmak amacıyla yapıştırılmaktadır.

1.2.1 Girdi (Input)

Girdi, fiziksel cismin üç boyutlu verisini içeren elektronik bilgidir. Girdi bilgisi (Input datası), bilgisayar modeli ve fiziksel model olarak iki şekilde tanımlanmaktadır. Bilgisayar modeli, ya yüzey ya da katı model olarak CAD sistemi tarafından oluşturulmakta iken, fiziksel model, imal edilecek olan parçanın, bilgisayarda otomatik olarak hacminin ve alanının hesaplanması ile ilgili bilgileri kapsamaktadır.

1.2.2 Uygulama Metodu

HP sistemlerinin yirmiden fazla satıcısı olmakla beraber metod her satıcı tarafından birçok kategoriye ayrılmaktadır; fotokurutma, kesme, birleştirme, ergitme, katılaştırma yöntemleri ile HP işlemleri gerçekleştirilmektedir.

1.2.3 Malzeme

Malzemenin ilk hali katı, sıvı veya toz fazında olması gerekmektedir. Katı fazda iken malzeme; yumak, tel veya katmanlar (tabakalar) halinde olabilmektedir. Ayrıca katı malzeme olarak, kağıt, naylon, reçine, balmumu, metal ve seramik görmek mümkündür.

1.2.4 HP Uygulama Alanları

- Tasarım
- Mühendislik, analizler ve planlama
- Takımlandırma ve imalat

Endüstride birçok alan; uçak, otomotiv, biomedikal, elektrik ve elektronik endüstri alanları HP sistemlerinden faydalanmaktadır.

1.3 Hızlı Prototiplemenin Avantajları

HP sistemlerinin faydaları direkt ve indirekt yani dolaylı ve dolaysız olarak ikiye ayrılmaktadır.

1.3.1 Dolaysız Faydalar

HP sistemlerini kullanan fabrika ve şirketlerin elde ettikleri faydaların sayısı oldukça fazladır. Bu faydalardan birincisi; objelerin çok kısa süre içinde elde edilmesi ve denenmesidir. Son 25 yılda piyasaya sürülen ürünlerin hemen hemen hepsinde şekilsel karmaşıklıklar artmıştır. Fakat buna karşın bu projelerin tamamlama süreleri artmamıştır. 1970' lerde dört hafta süren bir projenin tamamlanması, 1980' lerde 16 haftaya çıkmış, fakat CAD/CAM ve CNC teknolojilerinin gelişmesiyle proje tamamlama süreleri sekiz haftaya indirgenmiştir. HP sistemlerin gelişmesiyle de bu süre üç haftaya düşmüştür.

1.3.2 Ürün Tasarımcılarına Sağladığı Faydalar

Ürün tasarımcıları parça karmaşıklığını çok kısa sürede ve az bir maliyetle artırabilmekte, değiştirebilmekte ve müşterinin talebine göre, optimum parça dizaynını elde etmek amacıyla, belirli kısıtlar getirmektedirler. Sonuç olarak, parça sayısını azaltarak, birkaç prototip üzerinde hatalar, eksiklikler görülebilmekte ve düzeltilebilmektedir.

HP teknolojileri dizayn aşamasında da birçok fayda sağlamaktadır örneğin, talaşlı işleme esnasında zorluk gösteren çok küçük açılı veya delikler, HP yöntemleri ile çok rahatlıkla imal edilebilmekte, malzeme açısından, dayanım/ağırlık oranları işleme maliyetine bağlı kalmaksızın tayin edilmektedir. Bunların ötesinde teknoloji zaman açısından da büyük tasarruf sağlamaktadır.

1.3.3 Takım Tasarımcılarına ve İmalat Mühendislerine Sağladığı Faydalar

En temel fayda maliyet yönündendir. İmalat mühendisleri, imal edilecek parçanın dizaynını ve imalatını minimize edebilmekte, imalat için işçiliği, kontrol ve montaj için de, maliyeti azaltabilmektedirler.

1.3.4 Dolaylı Faydalar

Dolaylı faydalar satıcıya ve müşteriye olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Satıcıya sağlanan fayda; ürünün pazara çıkma süresinin kısaltılması, dolayısıyla risklerin azaltılması yönündedir. Birkaç yıla yönelik müşteri talebi, ihtiyacı veya piyasa dinamiğinin değişkenliği ile ilgili planlar yapmaya gerek yoktur. Çünkü önceden de belirtildiği gibi HP sistemleri ürün üzerindeki değişikliğe çabuk adapte olan bir sistemdir. Ayrıca, ürünler müşteri talebini çok iyi karşılamakta ve yeni ürünler çok ekonomik olarak test edilip pazara sürülebilmektedir

Müşteri açısından ise, müşteri kendi arzu ve talebini karşılayan ürünü çok rahatlıkla uygun fiyata alabilmektedir, çünkü çok geniş bir seçme alternatifi sunulmaktadır.

1.4 Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Sınıflandırılması

- Sıvı bazlı sistemler
- Katı bazlı sistemler
- Toz bazlı sistemler

1.4.1 Sıvı Bazlı Sistemler

Sıvı bazlı HP sistemlerinde işlem, kullanılan materyalin sıvı fazıyla başlamaktadır. En çok uygulanan sıvı bazlı yöntemler ise aşağıda sıralandığı gibi olmaktadır.

- 3D Systems' in Stereolithografi (SLA) Yöntemi
- Cubital' in Kurutarak Katılaştırma Yöntemi (SGC)
- Sony' nin Katı Oluşturma Sistemleri
- Mitsubishi' nin UV Lazerli Katılaştırma Yöntemi
- EOS'un Stereo Sistemleri
- Teijin Seiki' nin Katı Form Sistemleri
- Mücevher Endüstrisi için Meiko' nun Hızlı Prototipleme Sistemleri

1.4.2 Katı Bazlı

Katı bazlı sistemlerde kullanılan malzeme ya bir tel şeklinde rulo ya da katmanlar halinde olmaktadır. Katı bazlı sistemlerden bazıları aşağıda sıralandığı gibi olmaktadır

- Helisys' in Katmanlar Halinde Parça İmalatı (LOM)
- Stratasys' in Malzeme Ergiterek Yığılma Yöntemi (FDM)
- 3D Systems' in Multi-Jet Modellenmesi (MSM)
- IBM' in Hızlı Prototipleme Sistemleri

1.4.3 Toz Bazlı Sistemler

Toz faz da, katı faz grubuna dahil sayılabilmektedir, ancak kategori olarak katı bazlı sistemlerden farklı uygulanan bir yöntemdir. Kaı ve Faı' ya göre (1996) bu kategoriye dahil olan HP sistemlerinin bazıları ise;

- DTM' nin Seçici Lazer Sinterleme (SLS)
- Soligen' nin Direkt Kabuk Dökümü (DSPC)
- Fraunhofer' in Multifazlı Jet Katılaştırması (MSI)
- MIT' nin 3 Boyutlu Çıktı Alma Yöntemi (3DP)

1.5 Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Gelişimi

HP sistem üreticileri pazar içerisinde yeni bir pay oluşturmak için rekabete girmişler, belki de yeterli desteğe sahip olamadıklarından dolayı zarara uğramışlardır. Ayrıca HP sistem satışlarını, yarı maliyete sağlayan HP servis büroları da olumsuz etkilenmiştir. Ancak bu huzur kaçıran problemlerin ortadan kaldırılmasıyla, HP teknolojisi en sonunda modern dijital dizayn sistemleriyle birleştirilerek bir mühendislik metodu olmuştur.

Son zamanlarda HP endüstrisinin iyi durumda olduğu gözlenmektedir. Dünya çapında sistem satışları hızla devam etmektedir. HP için olumlu başka bir gelişme de kurulan Global Alliance ortaklığıdır. Bu ortaklık, 13 adet hızlı prototipleme ile ilişkili organizasyonun HP bilgilerini paylaşmak için kurdukları internasyonel bir grubu temsil etmektedir. Anılan teknolojinin olgunlaşmasındaki başka bir unsur da, endüstri standartlarını oluşturmak için bir hareketin başlamasıdır. Ashley' nin (1998) belirttiği gibi bu konuda Amerikan Ulusal Teknolojisi ve Standartlar Enstitüsü' nde (NIST) çalışma yapılmaktadır.

Wohlers firması, HP sistemlerindeki eşsiz gelişmeleri ve satış artışlarını raporlamıştır. 1995 yılında, ürün ve servis satışlarındaki artışın önceki yıllara göre %49 arttığı belirlenmiştir. Birincil HP piyasası ekipman, malzeme satışı, bakım, kullanım ve servis eğitimlerini kapsamaktadır. İkincil HP piyasası ise HP modellerden takım imalatını kapsamaktadır. Bu ikincil pazarın, HP birincil pazarına eklenmesinin bir sonucu olarak 176 milyon dolar daha ek kazanç sağlanmıştır. 1996 ve 1997' deki tahmini toplam satışlar sırasıyla 447 milyon USD ve 556 milyon USD' dir. 1988 ile 1995 yılları arasındaki HP satışları Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1. HP sistem satışları (Wohlers,1995)

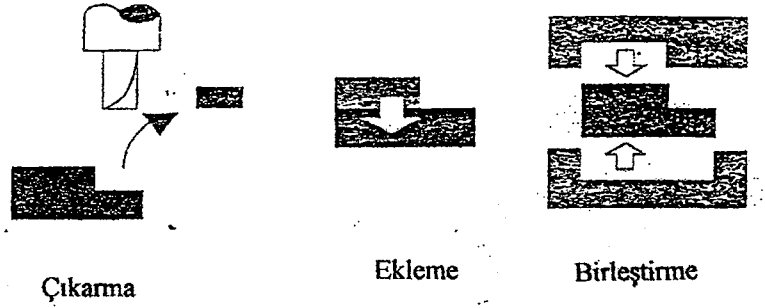
Firma	HP Sistemi	88	89	90	91	92	93	94	95	Toplam
3D Sistem	SLA	32	94	105	44	58	60	94	30	617
Stratasys	FDM	-	-	-	6	9	22	55	121	213
Helisys	LOM	-	-	-	3	10	27	76	70	185
DTM	SLS	-	-	-	-	5	33	30	40	108
Sanders Prototip	Model Maker	-	-	-	-	-	-	22	41	63
Soligen	DSPC	-	-	-	-	-	4	3	0	7
BPM Teknoloji	BPM	-	-	-	-	-	-	-	-	0
CMET	SOUP2	2	8	4	14	7	10	9	19	73
Teijin Seiki	SOLIFORM	-	-	-	2	0	1	7	14	24
Meiki	MEIKO	-	-	-	-	-	-	6	4	10
Eos	EOSINT	-	-	1	1	10	6	14	39	73
Cubital	SGC	-	-	-	5	6	7	5	3	26
Yıllık Toplam Satış		34	102	110	75	105	170	321	481	1399

Hızlı prototipleme yöntemleri, tasarımcı ve imalat mühendisleri tarafından modellerin somut bir şekilde elde edilmesini ve prototipleme prosesinin hızla başlatılmasını sağlamaktadır. Ancak bu aşamada, gerekli ekipman sağlanmasında maliyet açısından zorluklarla karşılaşmamak veya problemlere önceden çözüm bulabilmek için, firmaların finansal yönetimini, prototiplerin imalatında radikal bir değişim ihtiyacı duyulduğuna inandırmak gerekmektedir.

2. HIZLI PROTOTİPLEME PROSESİ

2.1 Prosesin Esasları

İmlat yöntemlerinde üç temel proses mevcuttur: Çıkartma, ekleme ve birleştirme.



Şekil 2.1 Üç temel işlemin şematik resmi

Şekil 2.1' de gösterildiği gibi çıkartma prosesinde, dolu bir bloktan, istenen parça elde edileceye kadar malzeme kaldırılmaktadır.

Ekleme prosesi ise, önceki işlemin tam tersidir. Elde edilen parçanın son şekli, başlangıçtakine göre çok daha büyüktür. İşlemin esası, farklı parçaların birleştirilip istenilen objenin elde edilmesine dayanmaktadır.

Birleştirme prosesinde de mekaniksel kuvvetler ve kısıtlayıcı kalıplar malzemeye uygulanmakta ve istenilen şekle ulaşılmaktadır.

Çıkarma işlemi ile gerçekleştirilen yöntemlerde, genellikle tornalama, matkaplama, taşlama, EDM, lazerle kesme, su-jeti ile kesme gibi talaşlı işleme proseslerinden faydalanılmaktadır.

HP proseslerinden Stereolithografi (SL) ve Seçici Lazerle Sinterleme (SLS) yöntemleri gibi daha birçok yöntem ise ekleme prosesi grubuna dahildir. Biçimlendirme prosesi ise kıvrma, kalıplama veya plastik enjeksiyon kalıplılığı sınıfına girmektedir. Bu yöntemler hem sac metallerin kıvrılmasını hem de erimiş ve katılaştırma sıvılarının kalıplanmasını içermektedir.

2.2 Proses Zinciri

Kai ve Fai' nin (1996) belirttiği gibi, tüm HP sistemleri genel anlamda benzer işlem zincirine sahiptir. Toplam olarak zincirde beş basamak vardır; 3D Modelleme, verinin dönüştürülmesi, kontrol ve hazırlama, parçayı oluşturma ve son işlemler. Diğer imalat prosesleri gibi, HP

sistemlerinden önce de proses planlamasının yapılması gerekmektedir. Proses planlamada, HP işlem zincirleri sıralanmaktadır. İlk aşama, üç boyutlu modellemedir. Bu aşamada bir çalışma istasyonuna ve CAD modelleme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Her bir operasyonu etkileyecek değişken faktör ve parametreler belirlenmektedir.

2.3 3 Boyutlu (3D) Modelleme

3D CAD modelleme işlemi, HP işlemlerinin önemli bir bölümüdür. Üç boyutlu (3D) geometrik model dizayn takımı tarafından stres analizleri, sonlu elemanlar analizleri, detay dizaynları ve imalat planlaması gibi birçok amaca yönelik incelenmektedir.

Birçok CAD/CAM sistemi 3D geometrik modelleme konusunda kolaylık sağlamaktadır. HP sistemleri ile ilgili, olarak kullanıcılar tarafından yanlış anlama söz konusudur. Bunlardan ilki; NC programlamaya benzetilmesidir. Anılan yanlışın sebebi ise, NC'de basit bir yüzey veya bir doğru elemanı NC elemanı olabilmekte iken HP sistemleri, kapalı hacimli bir modele veya katı bir modele ihtiyaç göstermektedir. Sonuç olarak HP kullanıcıları, sistem üzerinde çalışmalı ve bu konuda deneyim sahibi olmaları gerekmektedir. Parça içindeki görülemeyen cidarlar, küçük delikler her zaman için gözden kaçan ve parça üzerinde destekleyicilere ihtiyaç duyan bölümlerdir. Ayrıca her HP makinasının farklı bir özelliği olmaktadır. SLA'da ihtiyaç olan bir unsur SGC'de olmayabilmektedir.

2.4 Verinin Dönüştürülmesi

Katı veya yüzey model, STL dosya formatına dönüştürülmektedir. STL dosya formatı modelin yüzeyini küçük üçgenlere bölerek tanımlamaktadır. Kıvrımı fazla olan yüzeylerin birçok üçgen içermesi, STL dosyalarının kavisli parçalar için çok geniş olabildiğini ifade etmektedir.

Günümüzde CAD/CAM satıcılarının büyük bir kısmı kendi sistemlerinde CAD-STL ara fazını sağlamaktadır, 1970 yılından bu yana anılan bu fazı geliştirmiş ve kendi sistemlerine entegre etmişlerdir.

Dönüştürme işlemi, proses zincirlerinin en basit ve en kısa işlemidir. Ancak çok kompleks işlemlerde, düşük performanslı PC ve iş istasyonlarında dönüştürme işlemi zaman alabilmektedir.

Transmisyon işleminde ise bilgi STL dosyasına aktarılmaktadır. İş istasyonu STL dosyalarını içermektedir. Veri transferi diskette veya elektronik posta yolu ile ya da LAN (local area network) aracılığı ile gerçekleştirilmektedir.

2.5 Kontrol ve Hazırlama

CAD model hataları operatörler tarafından düzeltilmektedir. Ancak manuel düzeltme oldukça zaman alıcı ve bunaltıcıdır. SLA dosyasında tanımlanan modelin dilimlere bölündüğünü söylemiştik. Her bir dilimin genişliği 0,12 mm – 0.50 mm arasında değişmektedir. Hassasiyeti sağlamak amacıyla 0,12 mm' lik genişlikteki katmanlara bölünmesi tercih edilmektedir.

2.6 İşleme

İşleme aşaması, birçok HP sistemi için tamamen otomatik olarak uygulanmaktadır. Operatörler bu işlemi genellikle geceye bırakmakta ve sistem kendi kendine çalışarak parçayı oluşturmaktadır.

2.7 Son İşleme

Son işleme aşamasında manuel operasyonlara gerek duyulmaktadır. Sonuç itibarı ile de, bu aşamada parçaya zarar vermek mümkün olabilmektedir. Bu durumu engellemek operatörün vazifesi olmakla beraber Çizelge 2.1' de en çok uygulanan HP prosesleri için gerekli bitirme işlemleri gösterilmiştir. Temizleme işlemine en çok ihtiyaç gösteren yöntem SL (Stereolitografi) prosesidir. SL, reçinenin lazerle katılaştırılması esasına dayanan bir yöntem olduğu için temizleme mutlaka gerekmektedir. Temizleme işlemi ise çözücülerle gerçekleştirilmektedir. Çözücü, reakte olmamış foto duyarlı reçineyi temizlemek amacıyla kullanılmaktadır. Parçaya zarar vermemek için *oluşturma stili*; lazerle katılaştırılan reçinenin katmanlarının hangi yönde olduğu dikkate alınmalıdır. SL işlemi esnasında katılaştırılan reçinenin tam kuruması için son kurutma işlemi uygulanmaktadır. Bitirme işlemlerinde ise, yüzey kalitesini, parça estetiğini arttırmak amacıyla kumlama ve boyama işlemleri yapılmaktadır. Ayrıca matkaplama, tornalama ya da kılavuzlama gibi talaşlı işleme de uygulanabilmektedir.

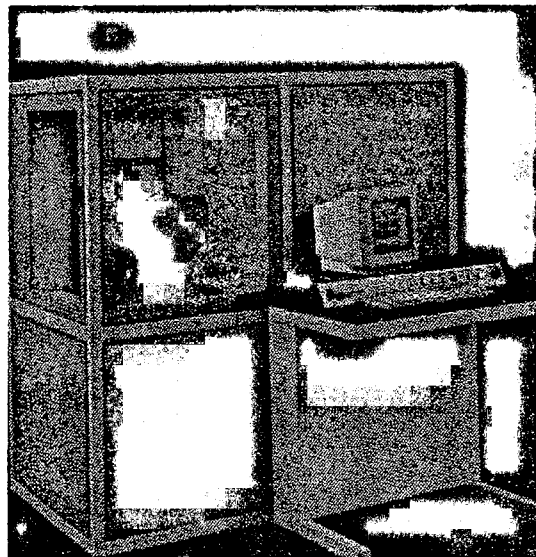
Çizelge 2.1 Farklı HP prosesleri için bitirme işlemleri (Kai ve Fai, 1997)

Hızlı prototipleme Teknolojileri				
Bitirme işlemleri	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Stereolithografi (SLA)	Ergiyik Malzeme Yığıma (FDM)	Tabakalı obje İmalatı (LOM)
Temizleme	✓	✓	X	✓
Son kurutma	X	✓	X	X
Bitirme	✓	✓	✓	✓

3. HIZLI PROTOTİP İMALAT TEKNOLOJİLERİ

3.1 Stereolitografi (SLA-Stereolithography Apparatus)

3D Systems Firması tarafından geliştirilen SL yöntemi, 1986 yılında Charles W. Hull ve Raymond S.Feed tarafından bulunmuştur (Jacobs,1992). Ticari HP sistemleri arasında, SLA cihazı en çok kullanılanıdır, piyasaya 1988 yılında sürülmüştür. Amerika' da 40' dan fazla ödül, uluslararası olarak 20' den fazla ödül almıştır. SLA yönteminde birçok seri makina bulmak mümkündür; SLA-190, SLA-250, SLA-350, SLA-500 gibi. SLA-190 ilk makinalardan olmaktadır. SLA-250 ise tüm dünyada en çok kullanılan modeldir, çalışma hacmi birçok uygulamaya elverişlidir. Makinalar, istenen parçayı oluşturma hızlarına ve sürelerine göre kıyaslanırsa, SLA-500 serisi SLA-350' ye göre %53 daha hızlıdır ve SLA-500 bu serinin en hızlı olanıdır (Jacobs,1992). Bu makinanın daha kuvvetli olma sebebi ise Argon-ion lazerinin kullanılmasıdır, kullanılan lazerlerin karakteristikleri ilerideki bölümlerde verilmiştir. 3D Systems firmasının SLA serileri tanıtım kataloglarına göre (1999), son SLA versiyonu SLA-7000 serisi hem hacim hem de zamanlama açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. 600 x 600 x 630 mm'lik boyutlardaki bu makina ile 0.0254 mm'lik hassasiyette katman taraması gerçekleştirilebilmektedir. Bu seri diğer tüm makinalara göre daha hızlı bir işlem gerçekleştirmektedir çünkü, süpürücü diğer makinelerde parça boyutlarını dikkate almadan tüm platformu tararken, bu seride sadece parça boyutları kadar tarama yapılmaktadır.



Şekil 3.1 SLA-500 makinası(Jacobs, 1992)

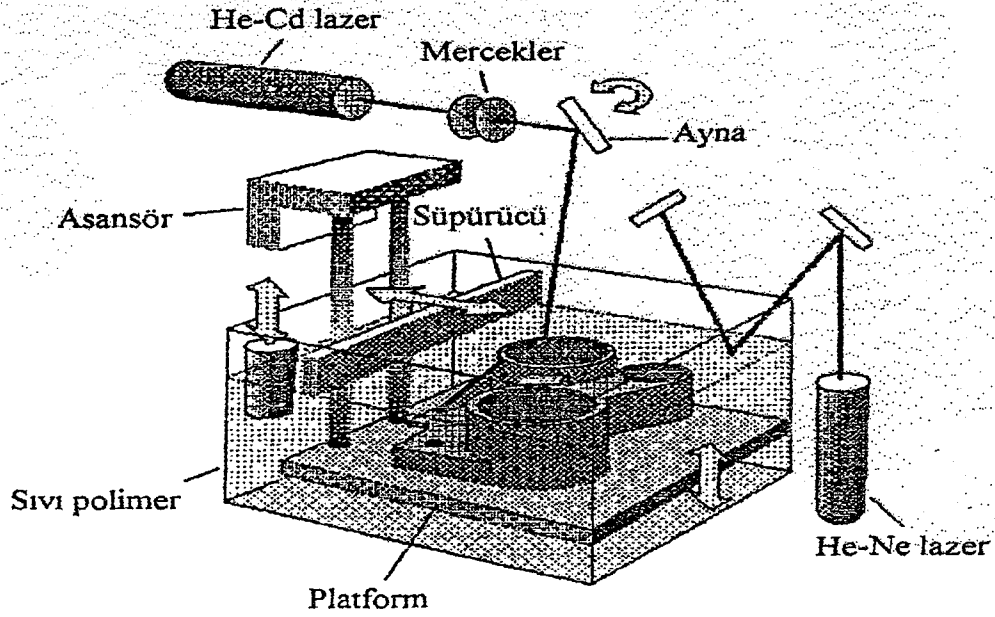
Çizelge 3.1 SLA makinalarının genel karakteristikleri (3D Systems,1997)

MODEL	SLA-250	SLA-500	SLA-3500	SLA-5000
Lazer tipi	HeCd	Argon iyon	KatıFaz Nd:YO4	KatıFaz Nd:YO4
Lazer gücü (mW)	16	132-264	160	216
Spot boyutu (mm)	0.2-0.29	0.2-0.25	0.23-0.28	0.23-0.28
XY tarama hızı (m/s)	0.762	5	2.54	5
Depo kapasitesi (litre ⁹)	29.5	253.6	99.3	253
Çalışma hacmi (mm x mm x mm)	250x250x250	508x508x584	350x350x400	508x508x584
Maks.Parça ağırlığı (kg)	9.1	68.04	56.8	68
Min. katman kalınlığı (mm)	0.1	0.1	0.1-0.05	0.1-0.05
Güç destekleyicisi	115/220(VAC) 15/8 (A)	115/220(VAC) 15/8 (A)	200/220(VAC) 15/8 (A)	220/240(VAC) 15/8 (A)
Yaklaşık fiyatı (US\$,1996)	100,000-170,000	490,000	800.000	-

3.1.1 İşlem

3D Sistemin Stereolithografi prosesinde, CAD modelden direkt plastik objeler oluşturulmaktadır. İşlem sıvı reçinenin fotokuruması ve sıvı yüzeyinin altında bulunan asansör platformunun hareketi ile başlamaktadır. Operatör üç boyutlu CAD katı model dosyasını sisteme yüklemektedir. Transformatör CAD datasını STL dosyasına dönüştürmektedir. Kontrol ünitesi, modeli 0,1 - 0,5 mm aralığında kesitlere bölmektedir.

Bilgisayar kontrollü optik tarama sistemi, lazerli ışık demetini odaklamakta ve iki boyutlu kesite karşılık gelen dilimdeki reçineyi katılaştırmaktadır. Şekil 3.2' de sistemin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. Daha sonra asansör sistemi bir sonraki katmanın katılmasına imkan vermek amacıyla bir katmanlık düşmektedir. Bu işlem parçanın en alttan en üste kadar parçanın oluşması bitene kadar devam etmektedir. Daha sonra da bitirme işlemleri ile işlem tamamlanmaktadır.



Şekil 3.2 SLA yönteminin çalışma prensibi

SLA sisteminin esas bileşenleri; kontrol bilgisayarı, kontrol paneli, lazer, optik sistem ve işlem odasından meydana gelmektedir. Sistem içinde yazılımın önemi büyüktür, bu yazılımın içerdiği modüller aracılığı ile, imal edilmek istenen parçanın CAD tasarımı üzerinde çeşitli düzeltmeler yapılabilmektedir. İçerdiği modüller ve görevleri aşağıda sıralanmıştır.

- 3D (üç boyutlu) doğrulama modülü

Bu model, orijinal CAD yazılımına (software) dönmeden önce STL dosyalarının bütünlüğü ve/veya yeterli düzeltmeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Üçgenler arası boşluk, üst üste binmiş yüzeyler gibi üçgen hatalarını tanımlamakta ve düzeltmektedir.

- Görüntü modülü

Görüntü modülü, STL dosyalarını tanımlamakta ve grafiksel formatta dosyayı dilimlemektedir. Optimum oluşturmayı elde etmek, görsel inceleme ve oryantasyon sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

- Birleştirme modülü

Bu modül ile birkaç STL dosyası sonraki aşamalarda kullanılmak üzere birleştirmektedir.

- Görünüm modülü

Bu modül, ilerki konularda anlatılacak olan destek yapıları geliştirmektedir. Destekleyici yapı, parça oluşturma işlemine çok büyük katkısı olan bütünlüğü bir yapıdır. Bu yapı, parçalar serbest kaldıklarında veya herhangi bir çıkıntı olduğunda, parçanın platforma sağlam bir şekilde bağlı kalmasını sağlamaktadır.

- Parça ayarlayıcı modül

Bu yazılım modülü parça oluşturmanın ilk basamağıdır. Uygun parça oluşturmak amacıyla kurulmuş ve yüklenmiş olan STL dosyasına yayılmış ağ formatını sağlamaktadır, yani parçayı tanımlamak için kafes dilimler halinde bölmeye hazırlamaktadır.

- Dilimleme modülü

Bu modül parça oluşturmadaki ikinci aşamadır. Hazırlanmış ağ formatını, parça ayarlayıcı modülden almakta ve parçayı katmanlar veya üç boyutlu kesitler içeren modele dönüştürmektedir.

- Birleştirici modül

Bu parça oluşturmanın son ve üçüncü aşamasıdır. Son oluşturma dosyalarını yaratan bu modül SLA tarafından kullanılmaktadır. Önceki iki modül aracılığı ile dilimlenmiş parçayı birleştirmektedir.

3.1.2 Yöntemin Esasları

- Lazer (UV) ışını etkisiyle kuruyabilen reçinenin, foto polimerizasyon prosesini esas alarak, yeterli lazer ışını uygulandığında katılaşması
- Optik tarayıcı sistemin her katmanı taraması (katılaştırması) ile işlemin tabaka tabaka gerçekleştirilmesi ve yöntemin asansör takviyeli mekanik bir sistemle desteklenmesi

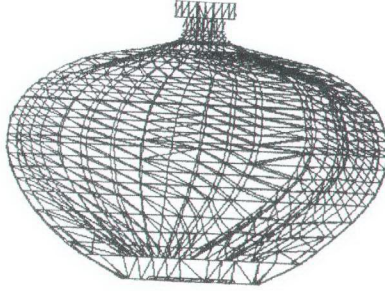
Aşağıda işlem aşamaları sırasıyla verilmektedir.

CAD Model

Parçanın üç boyutlu CAD modeli tasarlanmaktadır.

Dosya Dönüşümü

HP sistemine geçiş için CAD datası, dönüştürücü aracılığı ile SL makinasına aktarılmaktadır. Burada parçanın yüzey sınırları, çok sayıda üçgenle tanımlanmaktadır. Şekil 3.3' de kafeslerle tanımlanmış bir parçanın resmi görülmektedir.



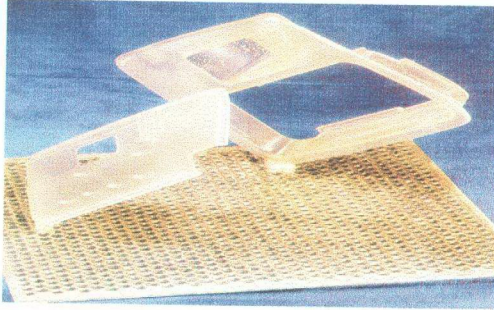
Şekil 3.3 Üçgen kafeslerle tanımlanmış parfüm şişesi

Destekler

Bu aşamada destek elemanları ayrı bir CAD dosyası olarak oluşturulmaktadır. CAD tasarımcıları bunu direkt veya ayrı bir yazılım kullanarak (örneğin Bridgeworks yazılımı) yapabilmektedir (Şekil 3.4).

Desteklerin kullanılma sebepleri aşağıda verilmiştir.

- Platformdaki olası bir çarpmanın parça işleme sırasında problem çıkarmaması için,
- Platformdan yükselen parçanın üst kısımlarının parça imalatının bitimine kadar desteklenmesi için,
- Parçanın imalatı bittiğinde platformdan rahat ve zarar vermeden alınabilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 3.4 SLA' da imal edilmiş parçanın platform üzerindeki görünümü

Dilimleme

Bu aşamada hem parça hem de destekleyiciler dilimlenmektedir. Parça bilgisayar tarafından, bir apartmanın katlara bölünmesi gibi, matematiksel olarak paralel yatay düzlemlere bölünmektedir. İşlem esnasında katman derinliği, talep edilen çizgiler arası boşluk, doğru genişliği, kendini çekme payı gibi faktörler seçilmektedir.

Dilimleme çözülümü ve dilim birimi

Bir dilim birimi, CAD birimi alanında yazılımın kullandığı değerdir. Yazılım tamsayıya ihtiyaç duymaktadır ve bu sebeble CAD birimi, *dilimleme çözülümü* adı verilen bir değer tarafından bölünmektedir. Bu değer normal olarak her inç başına 1000-10000 dilim birimi arasındadır. Bir parça 2 x 4.556 inç boyutundaysa ve dilimleme çözülümü 1000 ise parça 2000-4556 dilim birimden oluşmaktadır. Maksimum uygulanabilir dilim birimi 65.535 yani, herhangi bir eksende 6.5535 inçten büyük bir CAD değerinde olan parça veya destekler için dilimleme çözülümü 10.000'den az olmalıdır. Bu durum parçanın maksimum boyutlarını belirlemede önemli bir noktadır. CAD değeri 65.535 inçten büyük olmadıkça, dilimleme çözülümü 1000 değeri ile çalışmaktadır. Bu değer kullanıldığında bütün katman kalınlıkları ve tarama aralıkları 0.001 ile bölünecektir, dolayısıyla katman kalınlığı 0.003 inç olabilmektedir.

Skala

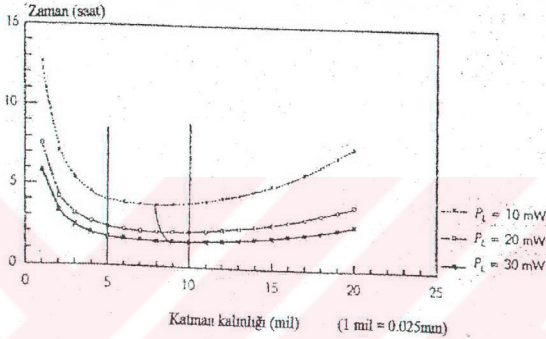
Skala, imal edilecek parça boyutları ile CAD model boyutları arasındaki orandır. Skala olarak bir (1) değerinin kullanılması parçanın gerçek boyutlarında, 0.5 değerinin kullanılması ise parçanın gerçek boyutlarının yarısı büyüklüğünde imal edilmesini gerektiğini belirtmektedir.

Katman kalınlığı

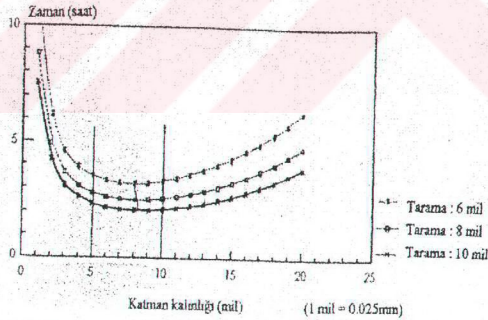
Dilimleme programı üç boyutlu STL dosyalarını iki boyutlu kesitler haline getirmektedir. Katman kalınlığı, asansörün aynı değerdeki adımlarıyla sağlanmaktadır. Böylece iki boyutlu kesitler, tabaka tabaka üst üste eklenerek üç boyutlu bir model oluşturmaktadır. Her dilimin kalınlığı yüzey yapısını, Z eksen hassasiyetini ve yapım hızını etkilemektedir. Şekil 3.5' de farklı lazer güçlerine göre katman kalınlığına karşılık imalat zamanları gösterilmiştir.

Tarama aralığı

Tarama aralığı parçanın katılaştırılmasında kullanılan ve sınırlar arasındaki hacim miktarını belirlemeyi sağlayan bir değerdir. Tarama yönü çok farklı şekillerde olabilmektedir. Weave yazılımı X ve Y eksenlerin birbirlerine paralel olduğu bir tarama şeklidir. Yaklaşık olarak her iki eksen için tarama aralığı 0.011 inçtir. Farklı tarama aralıkları için parça imalat süreleri Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.5 Farklı lazer güçleri için parça imalat süreleri (Jacobs,1992)



Şekil 3.6 Farklı tarama aralıkları için parça imalat süreleri (Jacobs,1992)

Minimum yüzey açısı

Minimum yüzey açısı (MSA), taranan yüzey boşluklarının hesaplanmasını sağlayan bir değerdir. Eğer MSA sıfır olarak alınırsa, o zaman sadece yatay yüzeyler doldurulmaktadır. Eğer MSA 50° olarak alınırsa, her tanımlanan üçgen yüzey 50° veya daha az bir değerdeki açıyla doldurulmaktadır.

Birleştirme

Birleştirme işleminde, destekler, parça ve aynı platformda imal edilen diğer parçaların bilgisayar gösterimleri birleştirilmektedir.

Parçayı hazırlama

Bu adımda işleme sırasında kullanılacak parametrelerin kesin değerleri seçilmektedir. Bu parametreler, sıyrıcı elemanın süpürme sayısı ve periyodu ile istenilen z-beklemesidir. Z-beklemesi, lazer ışını etkisiyle katılaşan bir katman reçinenin bir sonraki katmanın katılaşmasına geçmeden önce sistemin belirli bir süre bekleme yapmasıdır. Amacı, reçine yüzeyindeki düzensizliklerin sıvı ve dinamik gevşemeye uğramasını sağlamaktır.

İşleme

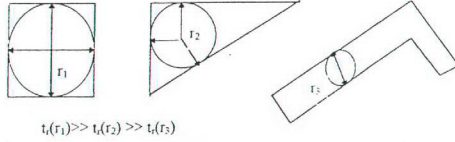
İşleme aşamasında, sıvı fotopolimer malzemenin polimerizasyonu ve üç boyutlu olarak oluşması başlamaktadır.

Seviyelendirme

Seviyeleme, eğer reçine polimerizasyon sonucu çekme yapmış ise gerekmektedir. Bu işlem ile reçine seviyesi optimum lazer odağının sağlanması için uygun bir z seviyesine getirilmektedir. Tipik SL reçineleri toplam % (5-7) arasında hacimsel çekmelere maruz kalmaktadır. Lazerin her tabakada katılaştırma yapmasından sonra, bir sezgi elemanı yardımıyla reçine seviyesi kontrol edilmektedir. Bu kontrol sırasında seviyenin tolerans sınırları içersinde kalmadığı tespit edildiğinde, bilgisayar kontrollü hassas bir step motoru tarafından pompa aktif hale gelmektedir. Pompanın hareketi ile reçine seviyesi basit sıvı hareketleri ile doğru konuma getirilmektedir. Reçine seviyesi tolerans sınırlarına getirildiğinde işlem tamamlanmış olmaktadır.

Kritik Daire Yarıçapı

Bir parçada kritik daire, reçinenin akabileceği herhangi bir kesitteki maksimum uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.7' de değişik kesit örnekleri verilmiştir. Daire yarıçapının artması, reçinenin katılaşma zamanının (t_c) orantılı olarak artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.7 Kritik daire örnekleri

Derin Dalma

Bilgisayar kontrollü olarak, z eksen doğrultusunda platform aşağıya hareket etmektedir. 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 yapılmaktadır. Platform, destekleri parçaya uyguladığı gibi reçine haznesine indirdiğinde, reçine yüzeyinde basınç meydana gelmektedir. Platformun yaptığı bu dalma işlemi, derin dalma olarak tanımlanmaktadır. Viskoz akışkanlar dinamiği ve deney sonuçları ile tanımlanan bu yüzey basıncının telafisi için zaman gerekmektedir. Bu noktada kritik daire yarıçapı (r_{kr}) tabaka kesiti için reçine viskozitesi ile doğru, basınç derinliğinin karesi ile ters orantılı olmaktadır. Bilinen tabaka ve reçine viskozitesi için r_{kr} sabittir.

Yükseltme

Yerçekiminin etkisi ile reçine bir önceki aşamada oluşturulan çöküntüyü doldurmaktadır. Bilgisayar kontrolü altında, z eksen boyunca, serbest reçine yüzeyi üzerindeki en üst parça katmanı yükseltilmektedir. Yapılan bu işlemin amacı, istenen kalınlıkta katman oluşturmak içindir, aksi takdirde gereğinden fazla reçine kullanılmakta ve dolayısıyla z bekleme süresi artmaktadır. Yükseltme işlemi tamamlandığında, önceki katılaştırılan tabakanın üst yüzeyi sıyırıcı elemanın alt kısmı ile bir tabaka kalınlığı sağlayacak şekilde konumlandırılmaktadır.

Süpürme

Süpürme aşamasında, süpürücü eleman reçine kabını önden arkaya doğru geçmektedir. Bu sırada da fazla reçineyi parça yüzeyinden uzaklaştırmaktadır. Tarayıcı eleman hareketini tamamladığında, sistem bir sonraki adıma hazır duruma gelmektedir Süpürme işleminin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajları,

- Parça geometrisinin büyük bir kısmı için optimum süpürme zamanı beş saniyedir. Yalnızca hapsolmuş hacimlere (parçanın geometrik olarak girinti ve oyukların çok olduğu bölgeler) sahip parçalar için toplam süpürme zamanı biraz artabilmektedir.
- Parça üzerinde aynı düzeyde ince tabakalar sağlanabilmektedir. Tabaka kalınlığındaki ölçülen değişimler çok küçük değerlerdir.

Dezavantajları;

Parçadaki dar geçitli kesitlerin reçine ile oluşturulması esnasında, yüzey gerilme etkileri, reçinenin süpürücüye yapışmasına neden olmaktadır. Bu durum, tabakada düzensizliklerin ve şişkinliklerin oluşmasına neden olmaktadır.

Z Beklemesi

Platform pozisyon oluşturmak amacıyla hareket ettiğinde, önceki katmanın üstündeki reçine, fiçi içindeki reçinenin serbest yüzeyi ile karışmalıdır. Ancak, yüzey gerilmelerinden dolayı, parçanın çevresi etrafında bir büküm meydana gelebilmektedir. Fakat daha sonraki kademelerde bu büküm değerinin, esneme payına, reçine viskozitesine ve yüzey gerilimine bağlı olarak azaldığı fark edilmiştir. Z bekleme aralığı, bu şekil bozukluklarının önlenmesine imkan tanımak amacıyla verilen bir zaman aralığıdır. Genellikle parçadaki ince katmanlar daha çok problem yaratmaktadır. Bu nedenle katman ince oldukça, daha çok z bekleme gerekmektedir.

Derin dalma aralığı yaklaşık 11 saniyedir. Yükseltme aşaması altı saniyedir. Süpürme genellikle beş saniyedir. Ancak süpürülecek hapsolmuş hacme göre bu süre 15 - 25 saniye kadar artabilmektedir. Platform son pozisyonuna döndüğünde lazer çizimi için sadece iki saniye geçmiş olmaktadır. Sonuç olarak, z bekleme en değişken değerdir. Genellikle 15 – 30 saniye arası değişmektedir, amlan değer 20 saniye olarak alınırsa, parçayı oluşturmak için katman başına harcanan toplam zaman 45 saniye olmaktadır.

Lazerle Katılaştırma

İlk aşamada verilen kesitlere göre parça sınırları belirlenmekte ve çizilmektedir. Dilimleme işlemi boyunca sınırlar için istenen kuruma derinliği seçilirken, bilgisayar otomatik olarak kuruma derinliğini ve reçine için lazer tarama hızını hesaplamaktadır. Sınırlar çizildikten sonra, sistemin bu bölgeleri taraması veya katılaştırması birkaç saniye almaktadır. Lazerle çizim işleminde en çok zaman, tarama işlemi için harcanmaktadır. Dolayısıyla HP parçasının

doğruluğu açısından bu kademe çok önemlidir. Lazer tarama hızı genel olarak, lazer çıkış gücü ve malzemeye bağlı faktörlere göre tayin edilmektedir.

Parça Tamamlama

Bir katman için çizme işlemi tamamlandıktan sonra, sonraki katmanlar içinde aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Yapılan çalışmalarla, SLA ile parça imali yapan kullanıcıların %90'nın işi tamamladığını, %10' nun ise değişik sebeplerden dolayı (güç problemleri, dosya hataları, kötü çalışma gibi.) imalat çevriminin durduğu görülmektedir. Bu, karışık parçaların oluşturulmasında dikkate değer bir başarıdır. Son tabaka tamamlandığında, bilgisayar z eksenini harekete geçirmekte, asansör yardımıyla platformu yükselterek parçayı reçinenin serbest yüzeyine çıkarmaktadır.

Parça Alma ve Temizleme

Parçayla bütünleşik olan platform, bu aşamada SLA makinasından ayrıştırılmaktadır. Fazla reçineyi temizlemek amacıyla lastik eldivenler veya özel kağıt havlular kullanılmaktadır. Gerekirse parça, çözücü temizleme sıvılarına yerleştirilmektedir.

Bu aşamadan sonra parça, düşük basınçlı sıkıştırılmış hava buharı ile kurutulmaktadır. Bundan sonra da parçayı platformdan ayırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu ayırma işlemi de özel bıçak veya hassas keskinlikteki makaslarla gerçekleştirilmektedir. Tüm bu işlemler sayesinde parçanın gerçek boyutlarından sapması engellenmiş olmaktadır.

Son Kurutma (PCA-Postcuring Apparatus)

Son kurutma aşamasına kadar, parça ancak kısmi polimerize olabilmektedir. Yani tam kurutma sağlanamamıştır. Polimerisasyonu tamamlamak amacıyla, PCA olarak adlandırılan son kurutma cihazı kullanılmaktadır. Mor ötesi (UV) radyasyonu sağlayan bu cihaz, optimum dalga boyu ve minimum sıcaklık artışı ile istenen kurumayı sağlamaktadır. PCA, kurutma distorsiyonlarını minimize eden, efektif bir cihazdır. Yaklaşık olarak bir veya iki saatte çok büyük parçalar kurutulmaktadır.

Son İşlemler

Son işlem olarak da parçanın kullanım alanına göre, kumlama veya taşlama, kılavuzlama gibi talaşlı işlemler uygulanabilmektedir. Bu talaşlı işlemler reçine çeşidine bağlı kalmaktadır. En çok talaşlı işleme maruz kalan reçine çeşidi ise ürean akrilattır. Bunun dışında talebe göre

boyama, metal spreyi ile kaplama gibi işlemler uygulanmaktadır. Aşağıda bitirme işlemleri madde madde açıklanmıştır.

- Parça kaldırma

Fotopolimer reçinelerden, özellikle akrilat esaslı olanlar katılaştıktan sonra pürüzlü yüzey vermektedirler. Bu sebeple, pürüzleri gidermek amaçlı lastik veya neopran eldivenler kullanılmaktadır. Başka bir yöntem ise selüloz esaslı keçe kullanmaktır.

- Parça temizleme

1987 yılından 1990 yılına kadar, HP parçalarını temizlemek amaçlı ; metil izopropil gibi alkol kullanılmaktaydı. Ancak yapılan deneylerle alkolün, parçada distorsiyonlara yol açtığı görülmüştür. Reçine temizlenmesinde Di-Propilen glikol monometil eter (DPM) ve tri-propilen glikol monometil eter (TPM) kullanılmaya başlanmıştır. Anılan iki bileşen kıyaslanırsa; DPM, TPM' ye göre daha zararlı iken, TPM' nin parlama noktası daha yüksektir (93°C), DPM nin ise 57°C' dir. Sonuç olarak TPM, alkol veya DPM' den daha güvenlidir. Galonu 7-8 dolar arasında olmaktadır. Temizleme işleminin gerçekleştirilmesi için, parçanın sıvı içinde 5-10 cm/sn hızla sürekli hareketi ile sağlanmaktadır. Süre ise normal, düz bir parçada 5dk.' dan daha az olurken, daha karmaşık parçalarda (derinliğin/çapa oranı 4:1 olduğunda), süre 15 dk.' ya yükselmekte ve bu süre parça karmaşıklığına göre daha da artabilmektedir.

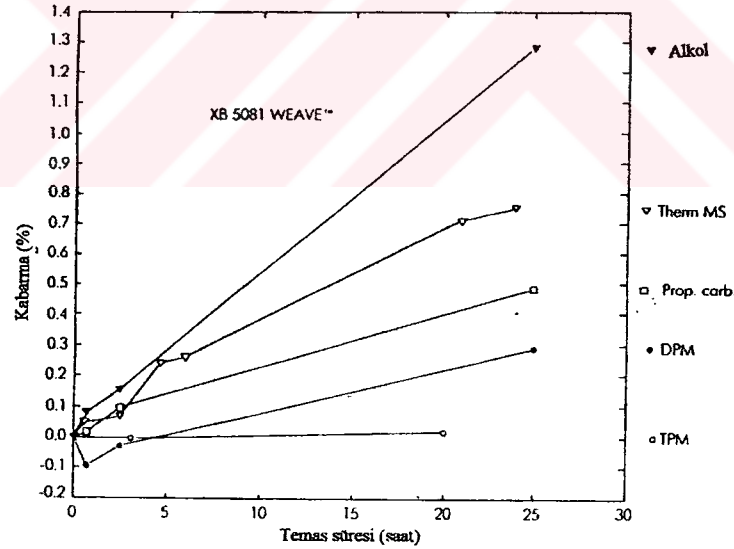
Kullanılan TPM nin yoğunluğu 0.96 gr/dm³. SL'nin ise 1.14' gr/dm³ dür. Karışımın yoğunluk değeri 0,98 gr/dm³ olduğunda TPM' nin değiştirme zamanı gelmiş olduğu anlaşılmaktadır. Hassas hidrometrelerle reçinenin konsantrasyonu ölçülerek %12' lik değer bir sınır olarak alınmakta ve karışım bu değere ulaştığında da yeni TPM' ye ihtiyaç duyulmaktadır.

Başka bir temizleme yöntemi ise ultrasonik cihazla yapılan temizleme yöntemidir. Cihaz bir pompa ve üzerinde birçok delik bulunan tüpten meydana gelmektedir. TPM, tüpteki pompalar boyunca sirküle edilmekte, birçok sayıda küçük jetler oluşturulmaktadır.

İlk başlarda SL için ısıtma işlemi, yapılan en büyük hata olmaktadır. Daha sonraları yüksek basınçlı, yüksek ışımalı civalı ark lambalarının kullanılmasıyla iyileşmeler kaydedilmiştir. Bu yüksek aktinik UV ışınım düzeyli civalı ark lambalarının kullanımında iki problemle karşılaşılmaktadır. Birincisi, çok kısa nüfuz derinliği ve ikincisi parçanın birkaç dakika içerisinde aşırı derecede aktinik ışınım dozajına maruz kalmasıdır.

SL reçineleri genellikle iyi ısı iletkenliğine sahip değildir. Aynı zamanda yüksek derecedeki aktinik ışınım oldukça ince bir tabaka halinde paçanın yüzeye yakın kısımları tarafından emilmektedir. Bunların etkisiyle reçine hızlı polimerize olmaya eğilim göstermekte ve yükselen sıcaklıkların sonucu olarak da, ince bölgelerde iç gerilmelere sebep olmaktadır. Şekil 3.8’ de XB-5081-1 reçinesi kullanılarak yapılmış deney sonuçları gösterilmiştir. Ulaşılabilen maksimum sıcaklığın havada 189 °C ve suda 148 °C dir. Lamba toplam olarak 10 dakika çalıştırılmaktadır. Tam ışımaya yaklaşık beş dakikalık bir periyot içerisinde gerçekleşmektedir. Ancak reçine maksimum sıcaklığa lamba yakıldıktan yaklaşık 30 dakika sonra ulaşmaktadır.

Yapılan bitirme işlemlerinden, sonra sıra parça ve desteklerin birbirinden ayrılmasına gelmektedir. Kırılgan polimerlerde genellikle ayırma işleminde kenarı körleştirilmiş bıçak ve spatula kullanılmaktadır. Dayanımı yüksek olan reçinelerde ise destek uzaklaştırma işleminde daha az problemle karşılaşmaktadır. Daha az kırılgan olmalarından dolayı kolayca kesilmektedir. Ayrıca, bu tip reçinelere frezeleme, tornalama ve delme işlemleri de uygulanabilmektedir (Jacobs,1992).



Şekil 3.8 XB 5081-1 reçinesi için ısıl işlem sıcaklıklar değerleri (Jacobs,1992)

3.1.3 SLA Sistemlerinde Kullanılan Fotopolimer Malzemeler

SLA ve diğer bazı HPI sistemlerinde sıvı polimer reçineler kullanılmaktadır. Sıvı fotopolimerler, belirli bir genişlikteki dalga boylarına sahip mor ötesi ışınlar kullanılarak elektromanyetik radyasyonla katılaştırılmaktadır. Katılma olayının esası; küçük

moleküllerin (monomerlerin) zincir formunda birleşip daha büyük olan molekülleri, polimerleri mor ötesi ışın altında katılaştırarak oluşturmasıdır. Bu egzotermik reaksiyona *fotopolimerizasyon* denmektedir.

Fotopolimerler epoksi, vinileter ve akrilat esaslı olmak üzere üç ana gruptan oluşmaktadır. Kimyasal bağları ve içeriklerine göre farklılık göstermektedir.

- **Akrilat Esaslı Fotopolimerler**

İlk fotopolimer türü, akrilat esaslı (A) olanlardır. İstenilen özelliklere göre bir çok akrilat esaslı fotopolimer reçineden seçim yapılabilmektedir. Bu tür fotopolimerlerde foto hız yüksek olmaktadır.

- **Vinileter Esaslı Fotopolimerler**

Vinileter esaslı (VE) fotopolimerler SLA-190 ve SLA-250 sistemlerinde 325 nm dalga boylarında He-Cd lazerleriyle kullanılmaktadır. Bu türlerin düşük viskoziteli olanları, diğerlerine göre parça üzerinden daha kolay temizlenmektedir. Düşük foto hızlara sahip olmaları dezavantaj iken avantaj olarak, bu tür reçineden oluşturulmuş parçada büzülme olayı düşük olmaktadır. Vinileter esaslı fotopolimerlerin özellikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Vinileter esaslı bazı fotopolimerlerin özellikleri (Exactomer kataloğu, 1997)

Fotopolimer ismi	İzafi foto hız	Büzülme faktörü (%)	Dp(mm)	Viskozite [cP] (30 °C' de)
Exactomer 2201	1.0	<1	0.18	205
Exactomer 2202 SF	2.9	<3	0.17	230

- **Epoksi Esaslı Fotopolimerler**

Epoksi esaslı (E) fotopolimerler ilk defa "3D. Systems" firması tarafından *Cibatool SL 5170* adıyla Temmuz 1993' de geliştirilmiştir (3D Systems katalogları,1997). Bu reçine SLA-190 ve SLA-250 sistemlerinde kullanılmakta ve 325 nm dalga boylarında He - Cd lazerle katılaştırılmaktadır. 1994 yılında SLA-500 sistemi için yine epoksi esaslı SL 5180 fotopolimeri geliştirilmiştir. Bu malzeme özellikle 351 nm dalga boylarında, Argon iyon lazer tabanlı sistemlerde kullanılmaktadır. SL 5170 ve 5180 reçinelerden imal edilen SL parçalarda efektif lineer çekme düşürülmüş, büzülme değeri azaltılmış ve diğer bazı mekanik iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle daha doğru SL parçalar elde edilebilmektedir. SL prototipinde, epoksi esaslı fotopolimer malzeme kullanımı ile bazı olumlu iyileştirmeler

yapılmış olmasına rağmen yine de fonksiyonel testlere uygun prototiplerde olması gereken özellikler sağlanamamaktadır.

Daha uygun prototipler elde etmek amacıyla ikincil işlemler (hassas döküm, kum kalıba döküm ve silikon kalıplama gibi) kullanılmaktadır. Bu şekilde çok daha uygun ve imal edilecek gerçek parçanın malzemesine en yakın malzemedan prototipler elde edilmiş olmaktadır. Sıvı ve katı durumdaki bazı stereolitografi reçinelerin 25°C' deki karakteristikleri Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Sıvı ve katı durumdaki reçinelerin özellikleri (Cibatool,1995)

Reçineler	SL 5149	SL 5081 - 1	SL 5170	SL 5180
Türü	Üretan akrilat	Akrilat	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 kendini çekme (%)	6.1	7.1	7.0	6.1
Efektif lineer çekme (%)	0.7	0.9	0.05	-0.2 ve 0.2 (işleme türüne bağlı)
Büzülme faktörü (%)	10	10	1-2 (işleme türüne bağlı)	6 - 3.5 (işleme türüne bağlı)

Çizelge 3.3' de görüldüğü gibi epoksi esaslı fotopolimer hacimsel çekme, efektif lineer çekme ve büzülme olaylarına göre daha iyi özelliklere sahip olmaktadır.

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

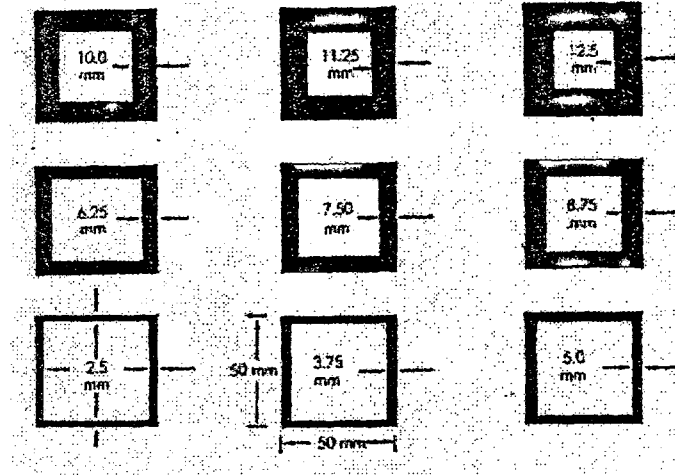
Katı sıvı geçişi nedeniyle meydana gelen çekmenin yanında büzülme olayı da fotopolimer reçinelerde ortak bir problem olmaktadır. Büzülme faktörü değeri akrilat esaslı olanlarda %10 seviyelerinde iken epoksi esaslı olanlarda bu değer % (5-6) değerinde olmaktadır.

3.1.4 Hata Bulma Testleri

Hata bulma testleri günümüzdeki yerinin önemli bir kısmını hata testlerini yapılmasına borçludur. Şekil 3.9' da görülen test numuneleri 3D Systems tarafından SL'de kullanılan reçinelerin ve yapım yöntemlerinin karakterize edilmesi için yapılmıştır.

Örneğin SL modelin ısı işleminden sonra oluşan büzülme oranının hesaplanması için 50x50 mm'lik et kalınlığı 12,5 – 2,5 m arasında değişen 9 kutu test numunesi olarak kullanılmıştır.

Bütün numuneler SLA' da imal edilmiş ve üç boyutlu Koordinat Ölçme Cihazında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da numuneler bir saat ısıtılma tabii tutulmuş ve ikinci kez üç boyutlu Koordinat Ölçme Cihazında ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 3.4' de verilmiştir.



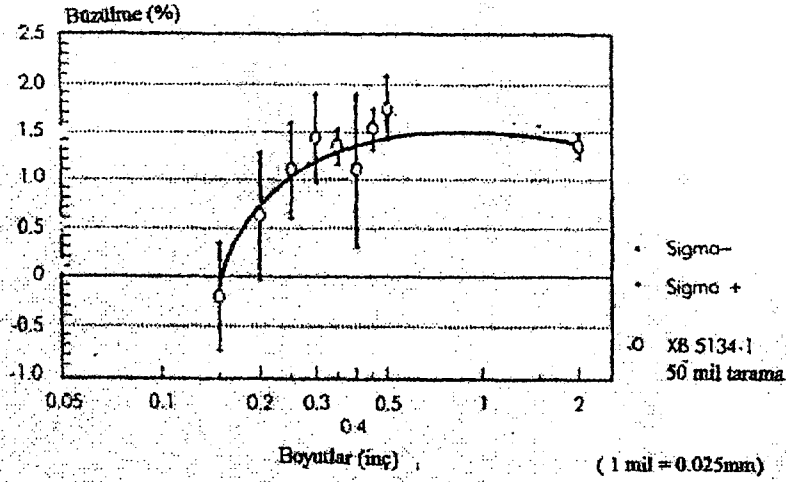
Şekil 3.9 Test numunelerinin üstten görünüşleri (Jacobs,1992)

Büzülme eğrisi lineer boyutların bir fonksiyonudur (Şekil 3.10). Büzülme genel olarak uniform değildir fakat parça oluşturma stiline (katmanların oluşma şekli ve yönün) bağlı olmaktadır. Kullanılan oluşturma stillerinden en başta olanı Weave yapım stilidir. Weave yazılımında, X ve Y ekseninin birbirine paraleldir. Bir parçanın katılaştırılmasında kullanılan ve sınırlar arasındaki hacim miktarını belirlemeye yarayan *tarama aralığı* değeri ise yaklaşık olarak her iki eksen 0.011 inçtir, aralık ince katman kalınlıklarıyla çalışırken azaltılmalıdır (0.005'' inç katman kalınlığı için yaklaşık 0.009'' aralık değeri kullanılmaktadır) (Jacobs,1992).

Büyük eğriler, ince et kalınlıkları için düşük oranlarda başlayıp, et kalınlıklarının artmasıyla eğriler de artmakta, daha geniş boyutlarda yine azalmaya başlamaktadır.

Çizelge 3.4 2'' üzerinden %büzülme oranları (Jacobs,1992)

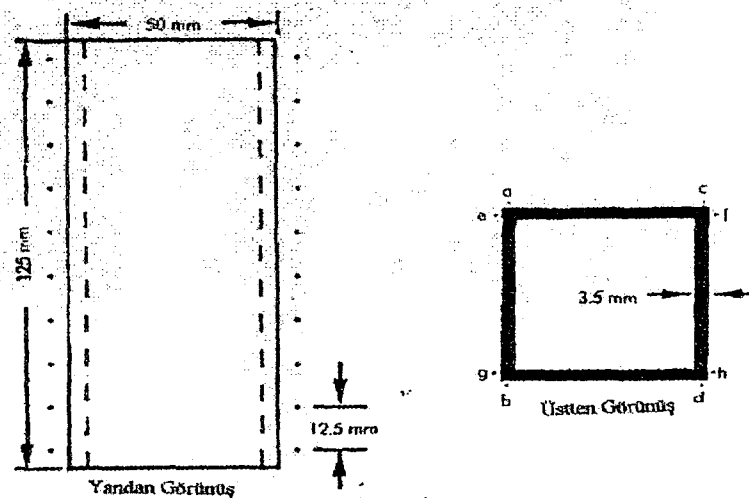
Reçine Tipi	TARAMA TIPLERİ			
	50 Tarama	25 Tarama	11 Weave	11 Star
XB 5081-1	1.20	0.81	0.72	0.56
XB 5134-1	1.34	0.89	0.69	-
XB 5139	1.28	0.83	0.73	-
XB 5143	1.15	0.63	0.24	0.19
XB 5131	1.19	0.59	0.73	0.28



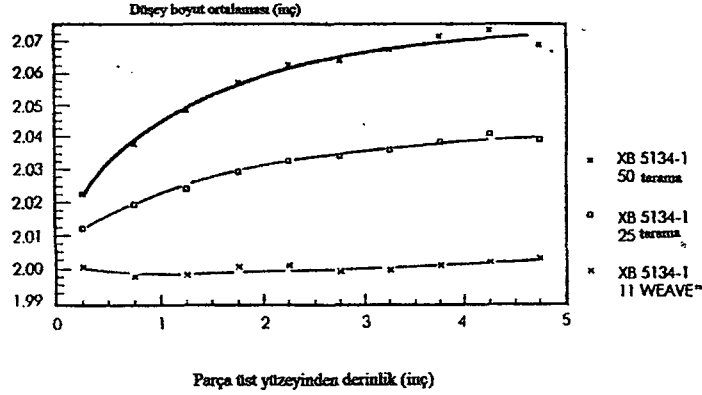
Şekil 3.10 Lineer boyutlara göre büzülme oranları (Jacobs,1992)

SL numunelerde karşılaşılan kabarma kusuru ise dış katılaşmış bölgenin içine sıvı reçinenin emilmesi sonucu oluşmaktadır. 3D Systems kabarmayı önlemek için 50 x 50x 125 mm boyutlarında ve yaklaşık 3mm et kalınlığında bir model kullanmaktadır. Bu model Şekil 3.11' de gösterilmiştir.

Model 24 saatlik bir periyot içerisinde imal edilmektedir. Oluşan katmanlar arasında bekleme 10 aralık için ölçülmektedir. Her düşey pozisyon için ölçümlerin ortalaması alınmakta ve parça üst yüzeyinden derinliğe göre bir eğri çizilmektedir. Şekil 3.12' de görüldüğü gibi kabarma eğrisi parçanın üst yüzeyinden itibaren olan derinliğin fonksiyonudur. Sonuç olarak, kabarma olayı, parça yapım stiline bağlı olmaktadır. Testlerin sonucu Çizelge 3.5' de verilmiştir.



Şekil 3.11 Test numunesi boyutları



Şekil 3.12 Kabarma eğrisi (Jacobs,1992)

Çizelge 3.5 Kabarma oranları (mil/inç) (Jacobs,1992)

Reçine Tipi	TARAMA TİPLERİ			
	50 Tarama	25 Tarama	11 Weave	11 Star
XB 5081-1	2.2	0.7	0.3	0.2
XB 5134-1	15.2	0.9	2.6	-
XB 5139	3.2	1.2	0.3	-
XB 5143	10.8	4.6	0.7	0.4
XB 5131	1.9	1.8	1.6	0.4

3.1.5 Makina Hassasiyeti

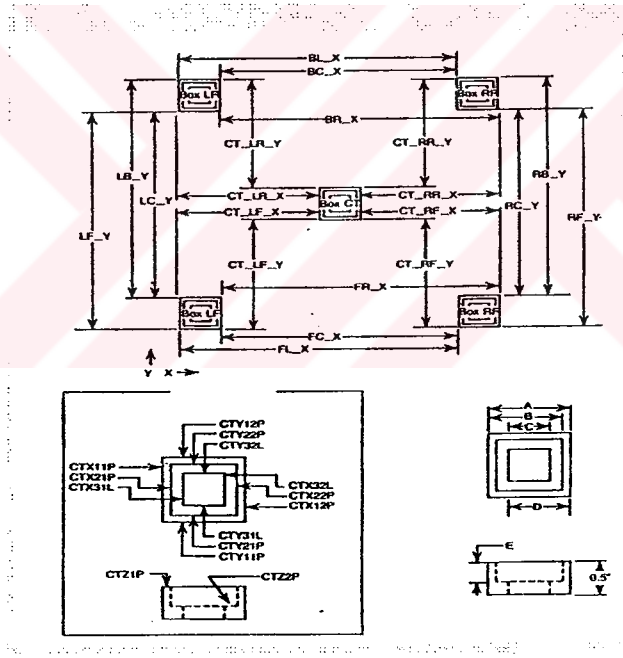
Makina hassasiyetini hesaplamak için çalışma işlemi diğer distorsiyonlardan mümkün olduğu kadar bağımsız tutulmalıdır. Makina hassasiyetinin hesaplanması için bir standart test parçası dizayn edilmektedir. İdeal bir test parçasının sahip olması gereken özellikler aşağıdaki gibidir.

- Üç boyutlu koordinat ölçme merkezinde kolaylıkla ölçülebilmelidir.
- Büyük, orta ve küçük boyut ölçülerini içinde barındırmalıdır.
- Büzülmeden en az etkilenecek bir geometrik yapıda olmalıdır.
- İmal edilmesi uzun zaman almamalıdır.
- Büyük miktarda reçine tüketmemelidir.

Makina hassasiyetini ölçmek amaçlı bir parça, ilk defa 3D Systems tarafından 1990 yılında tasarlanmıştır (Jacobs,1992). Biri platformun ortasında ve diğerleri köşelerde olmak üzere beş adet kutudan oluşmaktadır. Bu test parçası ile SLA makinası üzerinde hassasiyetin ve tekrarlanabilirliğin sağlanması için bir veri tabanı geliştirilmiştir.

Test parçasının imalatında aşağıdaki aşamalar izlenmektedir:

- Yapım stili seçilmektedir.
- Reçine tipi seçilmektedir.
- Parça imal edilmektedir.
- Parça temizlenmektedir.
- Boyutları ölçülmektedir.
- Bu ölçümlerden her boyutun gerçek değerleri hesaplanmaktadır.
- Nominal değerlere göre ölçümler gruplandırılmaktadır.
- Her grup için ortalama ve standart sapma değerleri alınmaktadır.
- Aynı şekilde 30 adet test parçası imal edilmektedir.
- 30 adet test parçasının ölçümleri için ortalama ve standart değerler hesaplanmaktadır.
- 30 test parçasından alınan veriler için skalanın bir fonksiyon olarak standart sapma grafiği çizilmektedir (Şekil 13).

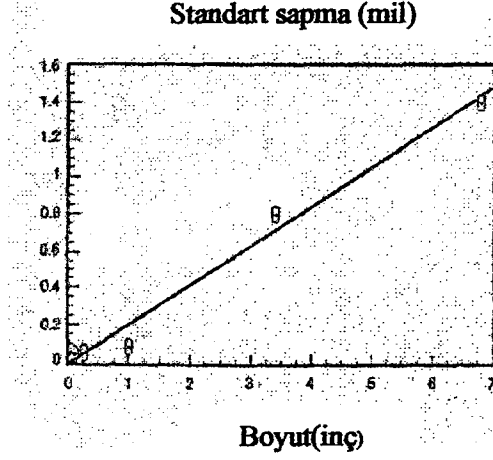


Şekil 3.13 Makina hassasiyeti belirlemede kullanılan test parçası (Jacobs,992)

Yapılan bu testlerden elde edilen sonuçlar;

- Ölçümlerin standart sapması parça boyutu ile orantılı olduğu için makina hassasiyetini parça uzunluğun yüzdesine göre hesaplanabilmektedir.
- Makina hassasiyeti diğer HP yöntemlerine göre çok daha iyidir.

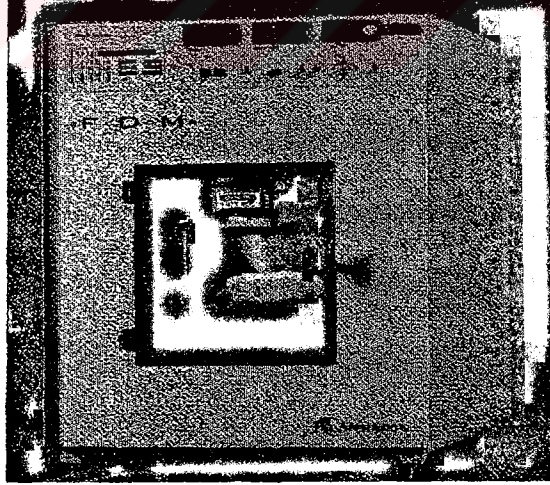
- Makinanın sahip olduğu yükek hassasiyet kapasitesi özellikle diğer seçeneklerin (yapım stili, reçine sıcaklığı, kalibrasyon gibi) optimum değerlere ulaşmasında kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 3.14 SLA standart sapma oranları

3.2 Ergitilmiş Malzeme Yığıma (FDM-Fused Deposition Modelling)

Tyberg ve Helge' nin de (1999) belirttiği gibi, FDM yöntemi, zehirli olmayan eritilmiş malzemenin ani soğutulup katman katman ısı etkisiyle yapıştırılması esasına dayanan bir işlemdir.



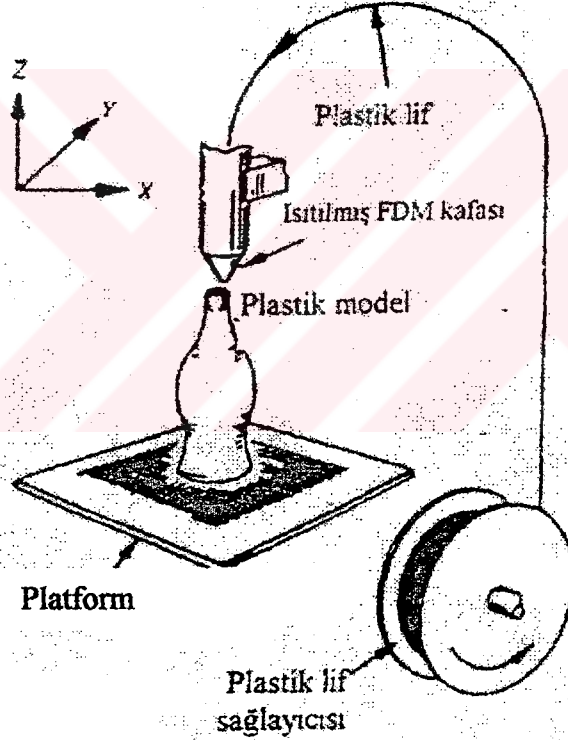
Şekil 3.15 FDM2000 makinası (Stratasys, 1999)

3.2.1 FDM sistemin çalışması

SL yönteminde olduğu gibi öncelikle bir CAD programında parça tasarlanmakta ve STL formatına dönüştürülmektedir. Daha sonra da STL formatındaki parça FDM makinasının güç

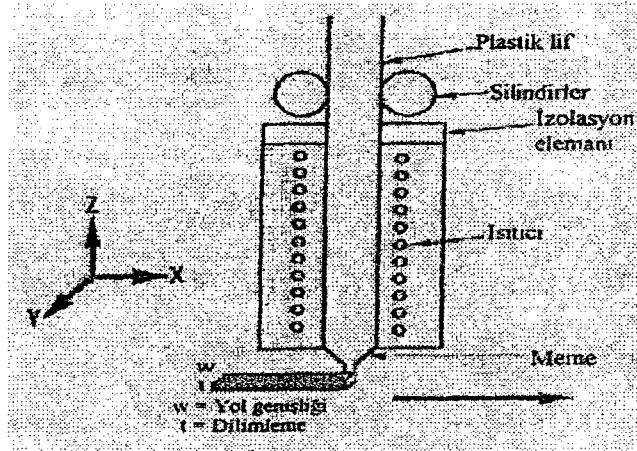
ünitesine aktarılmaktadır. Bundan sonraki işlemler ise FDM makinasının parça oluşturma donanımının otomatik olarak çalışmasıyla gerçekleşmektedir.

Tabaka malzemesi, bir ruloya sarılmış olan plastik lif halinde ısıtılmış FDM kafasına doğru beslenmektedir. (Şekil 3.16). Ekstrüzyon memesi, FDM makinasının bilgisayarından CAD dosyasından parça ile ilgili bilgileri almakta ve aldığı bilgiye göre tabakaları üst üste oluşturmaya başlamaktadır. İşlem parça tamamlanıncaya kadar devam etmektedir. Her tabakanın kalınlığı malzemenin fiziksel özelliklerine, hareketli kafa hızına, ekstrüzyon basıncına ve meme çıkış çaplarına göre tanımlanmaktadır. Tabaka kalınlığı tipik olarak 0.1 mm ile 0.5 mm arasında, hareketli FDM kafasına göre değişmektedir. Yol genişliği (w) (Şekil 3.17), 0.25 mm ile 6 mm arasında değişmektedir.



Şekil 3.16 FDM in çalışma prensibi (Jacobs, 1992)

Rulolara sarılı termoplastik malzeme yaklaşık 1.78 mm çapındadır. FDM işleminde termoplastik malzeme katılma noktasının biraz üzerindeki bir sıcaklıkta olmaktadır. Bu sıcaklık ve ekstrüzyon memesine (Şekil 3.17) malzemenin pompalanması kontrol edilmekte ve her tabaka bir önceki tabakaya ısıtılarak yapıştırılmaktadır. Plastik liflerin beslenme hızları monitörden izlenebilmekte, herhangi bir andaki ekstrüzyon edilmiş malzeme miktarı kontrol edilebilmektedir.



Şekil 3.17 FDM kafası elemanları (Jacobs,1992)

3.2.2 Lif Malzemeleri

Malzeme olarak, ABS, hassas döküm mumu ve termoplastik elastomerler gibi zehirsiz modelleme plastik lifleri kullanılmaktadır. ABS malzemedan elde edilen prototipler dökümle elde edilmiş parçaya yakın dayanıma sahip olmaktadır. Bu nedenle markalama, kumlama ve delme işlemleri yapılabilmektedir.

İşlenebilir mum, mavi ve gri renklerde olmakta ve enjeksiyon kalıplama işleri için kullanılmaktadır. Hassas döküm mumu, kırmızı ve akua renklerde olmakta ve direkt hassas döküm için model üretiminde kullanılmaktadır. Naylon benzeri plastikler beyaz renkte olup boyutsal uygunluk ve fonksiyonel test modellerinde kullanılmaktadır. Çizelge 3.6' da FDM yönteminde kullanılan lif malzemelerinin bazı özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

Çizelge 3.6 Bazı FDM liflerinin özellikleri (Stratasys,1999)

Malzeme	Döküm mumu	İşlenebilir mum	Plastic 2000	Plastic 3000
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
Darbe direnci (kJ/m ²)	-	-	9	13
Sertlik (Shore D)	-	-	58	70
Plastik lif çapı (mm)	1.3	1.3	1.3	1.3
Renk	Kırmızı	Mav	Poliefilen/Beyaz	Polyamid/açık
Fiyat (\$/cm ³) 1993 US\$	0.172	0.172	0.255	

3.2.3 İşlem aşamaları

- CAD dosyası, IGES formatı kullanılarak makinaya aktarılmakta,
- Stratasys firmasının geliştirdiği StrataSlice yazılımına dönüştürülmekte,
- Burada düzenlemeler yapılmakta, istenilen yüzey uyumu sağlanmakta,
- Dosya istenilen tabaka kalınlıklarında dilimlenmekte,
- Çıkış NC kod (belirli noktaların koordinatlarını içeren bir format) olarak alınmakta,
- FDM makinasında parça oluşturulmaktadır.

FDM yönteminde, 1650 serisinde (254 x 254 x 254) mm boyutlarına kadar parçalar 0,127 mm doğrulukta imal edilmektedir (FDM,1998). Quick Slice programı ile STL dosyaları kısa sürede elde edilebilmekte ve otomatik olarak dilimlenip dosya işlemeye hazır hale getirilmektedir.

3.2.4 FDM parçalarının kalitesi

Parça geliştirme aşamasında, bir prototipin imalatı zaman alan ve yüksek maliyet getiren bir işlem olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda ortaya çıkan yeni teknolojilerle CAD dosyalarından hızlıca fonksiyonel prototiplere geçilebilmektedir. Bir fonksiyonel prototip bize, tasarım yanlışlıklarını göstermekte ve tasarımın hızlı bir şekilde tamamlanmasına olanak tanımaktadır.

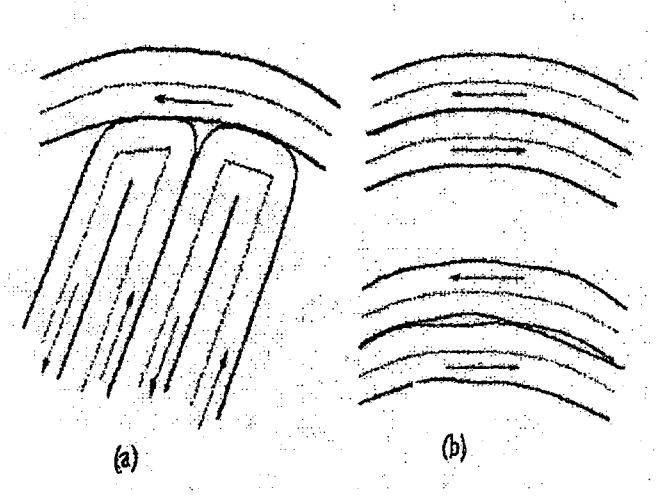
FDM parçalarda ortaya çıkabilecek hatalar, yüzey ve iç hataları şeklinde incelenmektedir.

a) Yüzey hataları: Bu tip hatalara merdiven adımı ve giriş etkilerinden dolayı karşılaşılmaktadır.

- Merdiven adımı etkisi: Hemen hemen tüm HP teknolojilerinde karşılaşılan bir sorundur. İlerki bölümlerde açıklanmıştır.
- Giriş etkisi: HP metotlarında genel olarak kullanılan STL dosyaları ile ilgilidir. STL dosyaları üçgenlerle döşenmiş yüzeyler topluluğudur. Tüm eğri yüzeyler bu üçgen elemanlarla tanım olarak ifade edilmeye çalışılmaktadır. Ama hiç bir zaman tam eğriyi yakalamak mümkün değildir.

b) İç hatalar: Bu tür hatalar donanım problemleri, yazılım sınırlamaları veya malzeme özellikleri ile ilgili ortaya çıkmaktadır. Çevresel boşluklar (Şekil 3.18a), FDM parçalarının çevresel kısımlarında tamamlanamayan boşluklardır. Malzemenin, boşluk bölümlerindeki

kesişmelerdeki hacimlerin doldurulması esnasında yetersiz akışından dolayı kaynaklanmaktadır. Önlemek için işlem parametreleri dikkate alınmalıdır. Başka bir hata tipi ise yol kesişimlerinde oluşan boşluklar ve yol kalınlıklarındaki değişim hatalarıdır (Şekil 3.18b). Malzemenin dengesiz akışından dolayı kaynaklanan hatalardır.



Şekil 3.18 FDM parçalarda iç hatalar

3.2.5 FDM' de Hız ve Doğruluk

FDM yöntemi yüksek kalitede ABS termoplastik ve hassas döküm mumundan modeller imal edilmektedir. Parça kalitesi ve çalışma hızı genel olarak aşağıda belirtilen dört alanla ilgilidir.

- Gelişmiş akış kontrol algoritması
- Gelişmiş plastik lif üretim işlemleri
- Yüksek XY malzeme yığma hızları
- Akıllı otomatik takım yolu oluşturan yazılımlar

İlk iki madde doğruluk ve tamamlama işlemlerini, son iki madde ise parça modelleme hızını iyileştirmektedir. FDM işlemindeki en büyük zorluk, parça doğruluğu veya görünüşten sapma olmaksızın hassas bir şekilde termoplastik malzemenin akışının başlatılabilmesi ve durdurulabilmesidir. FDM 1600-1650 makinalarında takım yolu ± 0.0127 mm sapmalardan daha küçük değerlerde oluşturulabilmektedir. Bu doğruluk, FDM ekstrüzyon kafasının hareketini kontrol eden yazılımın devamlı geliştirilmesi ile elde edilebilmektedir.

3.2.6 FDM Teknolojisinin Üstünlükleri

- Modellerin kısa zaman dilimlerinde hızlıca yapılabilmesi
- Doğruluğun sağlanabilmesi, 3D BDT dosyalarından modellerin tekrar elde edilmesi

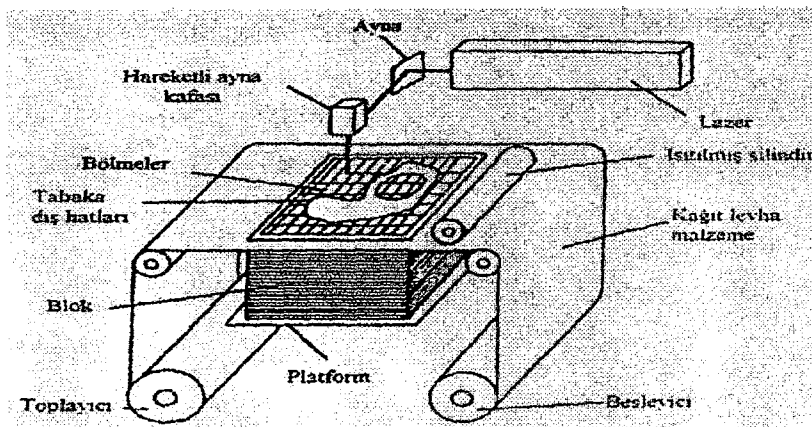
- Bir ofis ortamında çalışabilmesi, güvenli olması, zehirli olmayan maddelerin kullanılması. Özel parça ve ek aparata ihtiyaç duyulmaması
- Son kurutma işleminin gerekli olmaması
- İşlenebilir mum, hassas döküm mumu ve naylon benzeri plastik malzemelerden seçim yapılabilme olanağı sağlanması
- Düşük işletme maliyeti

3.2.7 FDM' in Uygulama Örnekleri

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

3.3 Tabakalı Cisim İmalatı (LOM-Laminated Object Manufacturing)

Helisys adlı firmanın geliştirdiği ve sunduğu bu yöntemde, tabakaları kesme ve daha sonra yapıştırma prensibi uygulanmaktadır (Jacobs,1992). Yüzeyi altında bir yapıştırıcı bulunduran tabakanın, bir silindir tarafından basılması ve ısıtılması suretiyle bir önceki tabakaya yapıştırılmaktadır. Tabaka takip edilen sınırları boyunca bir lazer tarafından kesilmektedir. Parçanın yapılması ile ortaya çıkan fazla malzemelerin taşınması için, sıvı bazlı HP işlemlerin tersine iç kısımlar taranmaktadır. Tabakanın kalınlığı sabit olmamakla birlikte, bir sezgi elemanı ile gerçek tabaka kalınlığı ölçülmekte ve model tayin edilen bu kalınlığa göre dilimlenmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 LOM sisteminin şematik resmi (Jacobs, 1992)

İşleme bölümüne gönderilen kağıt malzeme, CO₂ lazerle istenilen kesit formunda kesildikten sonra fazla olan kısım toplayıcı tarafından toplanmaktadır. Tabakaların üst üste yapıştırılması ile parça oluşturulmuş olmaktadır.

Birçok şirket imal etmek istediği parçanın sunulmasından önce bir modele veya prototipe ihtiyaç duymaktadır. LOM yöntemi ile elde edilen model veya prototipler fiziksel uygunluk ve fonksiyonellik bakımından kullanılmaktadır.

LOM sistemleri, daha doğru ve düşük maliyetli modelleri, klasik metotlara göre daha kısa zamanda sunabilmektedir. LOM doğrudan imal edilecek parçanın CAD modelinden başka hiçbir yan elemana ihtiyaç duymadan prototipi imal edebilme yeteneğine sahip bir yöntem olmaktadır. Sistem, bilgi girişlerini (imal edilecek parçanın CAD tasarımı gibi) diğer HP yöntemlerinde olduğu gibi STL formatında kabul etmektedir. Parçalar, dayanım ve minimum imalat zamanı için optimize edilebilmektedir.

3.3.1 Sistemin çalışması

LOM 1015 makinası 240 Volt elektrik enerjisi ile çalışan ayrıca bir elemana ihtiyaç duymayan bir sistem olmaktadır. Bu nedenle makina bir büro veya dükkanda kolayca işletilebilmektedir. Makina, 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 birleştirilmektedir. Modeller ısı ile yapışabilen ve kesilebilen değişik malzemeler kullanılarak imal edilmektedir. Tipik malzemeler olarak, ısıya duyarlı bir yapıştırıcı kaplı kağıt kullanılmaktadır. Polyester film veya diğer tabakalar parçanın özelliklerine göre seçilmektedir.

3.3.2 İşlem sırası

Kochen (1994) tarafından da bildirildiğine göre, malzeme, tabakanın bir önceki tabaka ile yapıştırılması için işleme bölümüne gönderilmektedir. Daha sonra ısıtıcı bir silindirin tabakalanmış kısmın üzerinden geçmesi ile sıkıştırma ve ısıtma işlemleri birlikte yapılmış olmaktadır. İşlemi tamamladıktan sonra, ısıtıcı silindir durma pozisyonuna geri çekilmektedir. Bir sonraki aşama, CO₂ lazer ışını yapıştırılmış tabakayı CAD sisteminde oluşturulmuş kesitteki iç ve dış profilleri verecek şekilde kesme işlemini gerçekleştirmektir. Kesmenin tamamlanması ile z ekseninde tabla, yavaşça aşağı inmekte ve yeni tabakanın oluşmasına

imkan vermek amacıyla z ekseninde tabla işleme konumuna gelmektedir. İşlem, tüm bu aşamaların parça bitimine kadar tekrar etmesiyle tamamlanmaktadır.

Aşağıda işlem sıraları detaylı bir şekilde izah edilmiştir.

İmal edilecek parçayı hazırlama

Öncelikle imal edilecek parçanın CAD tasarımı yapılmaktadır. LOM sistemine ait olan LOMSlice yazılımı ile CAD dosyasını STL formatına çevrilmekte ve giriş verisi ve ikincil veri yapıları otomatik olarak oluşturulmaktadır. LOM sistemi yazılımı, makinayı ve dilimleme işlemini kontrol etmektedir.

İşleme

İşleme aşamasında, yapıştırıcı kaplama malzemesi ince tabakalar şeklinde istenilen kesit formunda kesilerek birbirlerine yapıştırılmaktadır. İşleme çevrimi aşağıdaki aşamalardan meydana gelmektedir.

- LOMSlice yazılımı 3D modelin bir kesitini, yüksekliğini ve yatay düzlemde dilimleme işlemlerini gerçekleştirmektedir. Yazılım, kesiti görüntülemekte ve malzemeler etrafını diğer HP yöntemlerinde de ihtiyaç duyulan bir destek yapısına çevirmektedir.
- Bilgisayar, kesitteki dış hatları ve daha sonra da iç kısımları tarama kesmesi yapabilmesi için lazer ışını odaklama bilgilerini içermektedir. Lazer ışın gücü bir tabaka kalınlığında bir kesme derinliği meydana getirecek şekilde oluşturulmaktadır.
- Platform işlenmiş tabakalar ile alçalarak yeni tabaka malzemenin alınması pozisyonuna gelmektedir. Platform yükselmesi ile ısıtılmış silindir, tabaka üzerinden geçerek, basınç ve sıcaklık yardımıyla tabakanın bir öncekine yapışmasını sağlamaktadır.
- Düşey kodlayıcı, tabaka yığının yüksekliğini ölçer ve bu bilgiyi LOMSlice yazılımına iletmektedir. Daha sonra tabaka, modelin kesitteki formuna getirilmesi için hesaplanmaktadır. Tüm bu işlemler, parça bitinceye kadar devam etmektedir. Parça, işlem aşamaları tamamlandığında dikdörtgen bir blok içerisine alınmaktadır.

Model destek yapılar

Kesme işlemi esnasında, kesme alanı içerisinde bulunan ve parçanın son şeklinde istenmeyen arta kalan malzeme bulunmaktadır. Bu malzeme, modelin bitirilmesi ile kolayca alınabilmesi için lazer ışını ile küp elemanlara dilimlenmektedir. Modelin tamamlanmasıyla küçük küpler alınmaktadır.

Son İşlem

Bu aşamada parçadaki destek malzemesi temizlenip parçanın son işlemleri yapılmaktadır. İşlem aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir.

- Metal platform ve yeni imal edilmiş olan parça LOM makinasından alınmaktadır.
- Bir bıçak yardımıyla parça içersinde bulunduğu bloktan alınmaktadır.
- Parçanın belirli kısımlarında kalan malzeme ağaç işleme aletleri ile temizlenmektedir.

Parça tamamlandıktan sonra SLA yönteminde de yapılan kumlama, parlatma ve boyama işlemleri LOM parça üzerinde uygulanabilmektedir. Parçanın nem almaması için üretilen, epoksi veya silikon ile kaplanmaktadır. LOM parçalara konvansiyonel yöntemlerden delme, frezeleme veya tornalama işlemleri uygulanabilmektedir. LOM sistemlerinde tabakaları kesmek için CO₂ lazerleri kullanılmaktadır. Makinasına göre 25-50 W güçte ve lazer ışın çapı yaklaşık 0.25 mm değerinde olmaktadır.

3.3.3 LOM Uygulamaları

İmal edilen modeller temelde iki farklı kategoriye ayrılmaktadır.

- Bir tasarımın boyutsal doğruluğunun bakılması için yapılan modeller,
- Parçanın değişik formları için döküm gibi işlemlerde kullanılmak üzere imal edilen modeller,

İmal edilen model, kum kalıp dökümde model parça olarak veya hassas dökümde yakılmak suretiyle değişik formlar elde etmek üzere kullanılabilir. Daha fazla parça elde etmek için silikon kalıp imalatı yapılabilir. Çizelge 3.7'de LOM sistemine ait bazı parametreler verilmiştir.

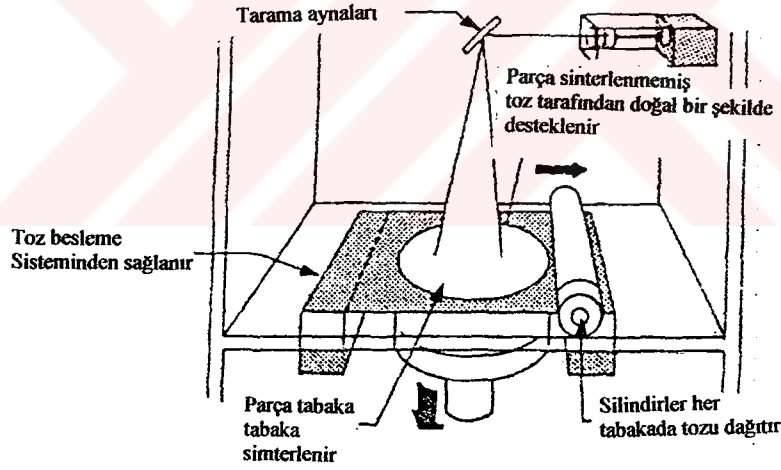
Çizelge 3.7 LOM sistemine ait parametreler (Kai ve Fai, 1997)

LOM makinası	LOM-1015	LOM-2030
Lazer tipi	CO ₂	
Lazer gücü (mW)	25	50
Nokta boyutu	0.25-0.38	0.203-0.254
XY tarama hızı (m/s)	0.38	0.61
Parça hassasiyeti (mm)	± 0.25	± 0.25
Levha kalınlığı (mm)	0.05-0.38	0.05-0.38
İş hacmi (mm x mm x mm)	380x250x350	810x550x500
Makina yerleşim alanı XYZ (m x m x m)	1.2x0.9x1x1.27	2.08x1.47x1.42
Veri kontrol ünitesi	486 DX, MS Microsoft NT, MS-DOS ve LOM Slice	
Yaklaşık fiyat (USD,1996)	92.600	1800

3.4 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici Lazer Sinterleme yöntemi, 1987 yılında kurulan DTM Firması tarafından geliştirilmiştir (Jacobs, 1992). Bu yöntemde, toz haline getirilmiş termoplastik malzeme bir lazer ışını ile ergitilerek üç boyutlu parçalar oluşturulmaktadır (Şekil 3.20).

İşlem, diğer HP yöntemlerinde olduğu gibi bir CAD istasyonuna ihtiyaç göstermektedir. Tasarımı tamamlanmış parçanın CAD dosyası STL formatına dönüştürülmektedir. Bu aşamada, parça şekli bilgisayar tarafından otomatik olarak dilimlendikten sonra uygulama başlamaktadır. Öncelikle parçanın imal edileceği platform üzerine ısıyla eriyen ince bir tabaka malzeme sürülmektedir. CO₂ lazeri, toz tabakanın üzerine parçanın o bölgesinin şeklini çizmektedir. Lazerin sağladığı ısı, temas ettiği bölgede tozun eriyerek istenen katı parça geometrisinin oluşmasını sağlamaktadır. Parçanın o seviyedeki kısmı lazer ile katılaştırıldıktan sonra bu tabakanın üzerinde yeni bir toz tabakası oluşturulmakta ve CO₂ lazeri tekrardan işlemeye başlamaktadır. Parça tamamlanana kadar bu çevrim devam etmektedir.



Şekil 3.20 SLS sistemin şematik resmi

3.4.1 SLS Yönteminde Kullanılan Malzemeler

Kullanılan malzemeler; plastikler, mum, metaller, naylon ve polikarbonatlardan oluşmaktadır. Çizelge 3.8’de SLS sisteminde kullanılan bazı malzemelerin özellikleri ve fiyatları verilmiştir.

- Mum: Döküm sanayisinde balmumu model yaratmak için kullanılan bir malzemedir.
- Polikarbonat: Dayanıklı ve sağlamdır. Bu tip malzemelerle çabuk ve seri imalat gerçekleştirilmekte, prototipleri ince yapılı parçalar için ideal olmaktadır.

- Naylon: Sanayide kullanılan dayanıklı prototipleme malzemesidir. Isıl ve kimyasal dayanım sağlamaktadır. Anılan çeşitte dayanım gerektiren prototipler için ideal olmaktadır.

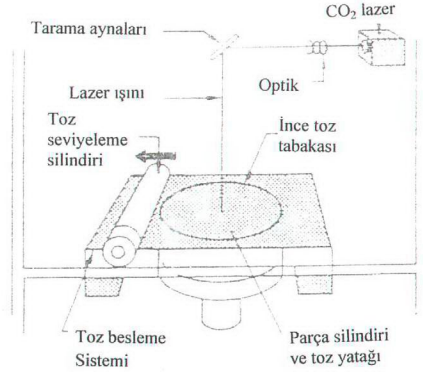
Çizelge 3.8 Bazı SLS malzemelerin özellikleri (DTM, 1997)

Malzeme	Firma	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastiklik Modülü (Gpa)	Maks. Çekme dayanımı (Mpa)	Çekme Uzaması (%)	Darbe direnci (kJ/m ²)	Fiyat (\$/cm ³) 1993 US\$
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

3.4.2 Sistemin Çalışması

Kimble'ın da (1991) belirttiği gibi, toz halindeki termoplastik malzeme işleme bölümünde bir silindir yardımıyla düzgünce yayılmaktadır. Sonra, parça kesitine uygun numune, toz yüzeyinde lazerle çizilmektedir (Şekil 3.21). Amorf malzemede lazer ısısı, toz parçacıkların ergiyerek birbirlerine yapışıp katı kütle oluşturmalarına neden olmaktadır. Bu işlem ergitme ve sinterleme olarak tanımlanmaktadır. Her tabaka, üzerinde kalan tozla şekillenmektedir. Tüm tabakalar şekillendirildiğinde bitmiş parça, daha sonra alınacak olan serbest toz kalıp içerisinde gömülü durumda bulunmaktadır.

Parça, hareket eden bir piston tarafından desteklenen toz silindirinde şekillendirilmektedir. Silindir iki taraftan beslenen tozu içeren taşınabilir kartuşlarla kuşatılmaktadır. Bir dönme/seviyeleme silindiri tozun bir kartuştan diğerine hareket etmesi için diğer yöne dağıtmaktadır. Bir 50 W CO₂ lazer, 10.600 nm dalga boyunda kızıl ötesi radyasyon üretmektedir. Bu bir çok malzeme tarafından emilip sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır. Lazer radyasyonu parça silindirdeki toz yüzeyine odaklamakta ve bilgisayar kontrollü tarama aynaları ışığın pozisyonunu yönlendirmektedir.



Şekil .3.21 SLS sistemin çalışması (Jacobs,1992)



Şekil .3.22 DTM makinası (DTM firması internet sayfası)

3.5 Katı Tabaka Kurutma Yöntemi (Solid Ground Curing – SGC)

SGC (Solider) yöntemi, İsrail asıllı Cubital Ltd. Firması tarafından geliştirilmiştir (Karı ve Faı,1997). Firmanın Solider 4600 ve Solider 5600 olmak üzere iki ürünü bulunmaktadır. Solider 4600, Cubital' in üç boyutlu modeller imal eden en temel sistemi olmakta iken, Solider 5600 en son sistemi olmaktadır. Her iki sistemin özellikleri Çizelge 3.9' da gösterilmiştir.

SGC yönteminde, parça yapımında malzeme olarak farklı çeşitlerde sıvı ve katı reçine, destek malzemesi olarak da suda çözülebilen balmumu kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler ile ilgili özellikler Çizelge 3.10' da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 Solider 4600 ve Solider 5600 makinaların özellikleri (Kaı ve Faı)

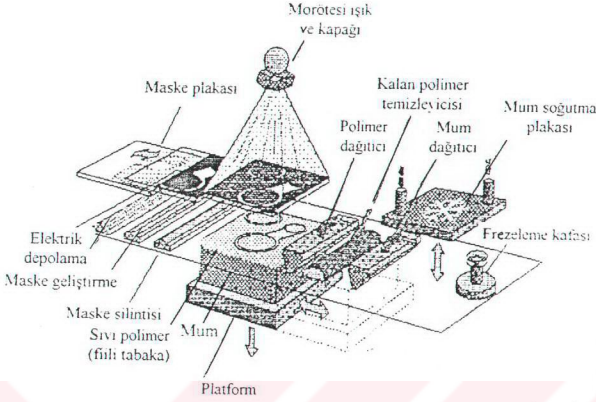
MODEL	SOLİDER 4600	SOLİDER 5600
İşılama aracı	Yüksek güçlü UV lambası	
Yüzey tanımlaması	0.15	0.15
Asansör düzey hassasiyeti (mm)	0.15	0.1 – 0.2
Üretilbilir minimum boyut (mm)	0.4 (Yatay, X-Y) 0.15 (Düsey, Z)	0.4 (Yatay, X-Y) 0.15 (Düsey, Z)
İş hacmi (mm x mm x mm)	350 x 350 x 350	500 x 350 x 500
İmalat hızı (cm ³ /h)	550	1311
Minimum katman kalınlığı (mm)	0.06	0.06
Boyut hassasiyeti	%0.1	%0.1
Makine yerleşim alanı XYZ (m x m x m)	1.8 x 4.2 x 2.9	1.8 x 4.2 x 2.9
Yaklaşık fiyat (USD,1996)	295.000	475.000

Çizelge 3.10 SGC Sisteminde kullanılan polimer malzemelerin özellikleri (Cubital Ltd.' in internet sayfası)

Malzeme	Firma	Yoğunluk (gr/cm ³)	Elastiklik modülü (GPa)	Maks. Çekme dayanımı (Mpa)	Kendini çekme uzaması (%)	Fiyat (USD,1993)
Tip G	Coates/ Solimer	1.1	0.88	35	16	0.071
Tip F	Coates/Solimer	1.1	0.23	13	55	-
4112-143	DSM/DeSolute	1.2	1.0	36	18	0.031

3.5.1 Sistemin Çalışma Prensibi

- Veri hazırlama: Prototipi yapılacak parçanın CAD modeli yapılarak elde edilen tasarım maske yapımıcısına gönderilmektedir.
- Maske hazırlama: Maske yapımıcısı veriyi aldıktan sonra tablanın üstünde ionografik bir yöntemle elektrostatik renklendiriciyi kullanarak görüntüyü oluşturmaktadır.
- Model yapımı: İlk aşamada işlenecek yüzeye ince bir tabaka fotopolimer sürülmekte, maske yapımıcının yaptığı fotomask, iş parçasının üstüne ve UV lambanın altına yerleştirilmektedir. UV ışığına maruz kalan reçine katlaşıp, sertleşmektedir (Şekil 3.23). Genellikle anılan bu yöntemle imal edilen prototipler arzu edilenden daha sert yapılmaktadır, böylece parça daha sonra yapılabilecek olan delme işlemlerine dayanım gösterebilmektedir. Tüm bu işlemlerden sonra, iş parçasından katılmışamış reçinenin çıkartılması için vakumla emme işlemi devreye girmektedir. Bu aşamayı takiben, sıvı reçinenin boşalttığı yerlere sıvı balmumu sürülmektedir. Balmumu soğuyunca, katı bir tabaka oluşturulup, arzu edilen inceleğe indirilebilmektedir.



Şekil 3.23 SGC sisteminin şematik görünümü (Karı ve Fı, 1996)

Maske oluşturulurken, çalışma platformu ince sıvı fotopolimer malzeme ile kaplanmaktadır. Daha sonra çalışma bölümüne konumlandırılmaktadır. Optik maske, platform üzerine hassas bir şekilde getirilmektedir. Kapağın açılması ile ışık parçası 3 sn ile 2 W güçteki mor ötesi ışığa maruz kalmaktadır. Işık parçası aerodinamik silecek altından geçmekte ve yalnızca katılmış kısmın arkasında kalmaktadır.

Maske levhası, maske çiziciye dönmekte, boşaltma ve silme işlemleri ile ilk tabaka maskesini gelecek tabakaya hazırlamaktadır. Işık parçası şimdi gelecek istasyona hareket etmektedir. Burada ergitilmiş mum, ince tabaka yüzeyine yayılmakta, tüm boşluklar ve işlenmemiş sıvının giderilmesinden sonra, kalan çukurlar doldurulmaktadır. Işık parçası, tabaka kalınlığını daha önceden tanımlanan değere indiren bir freze takımının altına geçmektedir. Böylelikle gelecek olan tabaka için düz ve iyi bir yüzey hazırlanmış olmaktadır. Tüm bu işlemler parça tamamlanıncaya kadar devam etmektedir. Son tabaka tamamlandığında, model veya mum, bloğa gömülmüş durumda olmaktadır. Mum bir mikrodalga fırınında ergitilebilmektedir. Mumu eritmek için uygulanan başka bir yöntem de, sıcak bir hava tabancası veya 60 °C sıcak su kullanmaktır (Jacobs, 1992).

Modellerde doğruluğun eldesi, modelin tam kurutulması ve her tabakanın işleme esnasında desteklenmesi ile sağlanmaktadır. X-Y düzlemlerindeki maskenin doğruluğu, her tabakanın Z düzleminde istenilen kalınlığa getirilmesini sağlamaktadır.

3.5.2 SGC Sistemi ile diğ er HP Sistemleri Arası Farklılıklar

En temel fark, polimerin bulunduğu haznenin hareketidir. Burada hazne hem düşey hem de yatay doğrultuda hareket etmektedir. Yatay hareketler iş parçasının makinada farklı konumlara ve bölgelere gelmesini sağlamaktadır.

İkinci bir fark, kullanılan ışık kaynağı ile ilgilidir. Bir lazer demeti kullanımı yerine, ilgili bölüm tamamen ışıkla doldurmak ve tabakayı bir kerede katılaştırmak amaçlı mor ötesi lamba diğ er bir deyişle civalı lamba kullanılmaktadır. Ancak bu aşamada, kurutulması istenilen alanların seçimi için daha önce bahsedilen bir maske, bir cam levha üzerine oluşturulmakta ve kullanıldıktan sonra silinmektedir. Maskeli cam levha, lamba ile iş parçası arasına yerleştirilmektedir. Maske, lazer yazıcılarda kullanılan benzer bir işlemler yapılmaktadır.

Son bir farklılık ise, parçalar mum ile etrafı sarılmış bir imal edilmektedir, destek yapıya ihtiyaç yoktur. Tek bir aşamada bir tabaka morötesi lambaya maruz kalmaktadır, ancak kullanılan polimer anılan bu tek aşamada tamamen kuruyamamaktadır. Bu sebeple, sıvı polimerle dolmuş fakat kurutulamamış bölgeler mum ile yer değiştirilmektedir. Bu durum, kalan sıvı polimerin temizlenmesi ve bir mum tabakasının uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Mum, soğuk bir metal kullanılarak sertleştirilmekte ve sonradan tabakanın doğru yüksekliğe gelebilmesi için frezelenmektedir. Freze istasyonu, tabakaların taşınmasına imkan vermektedir, daha sonra bu istasyondan geri dönmek mümkün olabilmektedir. Polimerin yeni tabakası, iş parçası freze istasyonundan işlem görmüş bölgeye geri döndüğünde oluşmaya başlamaktadır.

3.5.3 SGC Yönteminin Üstünlükleri

- İnce kısımlarda çekme ve çarpılmaların minimuma indirilmesi
- Son kurutmaya gerek duyulmaması
- Destek oluşturmak için yazılıma gerek duyulmaması
- Kullanılan polimerlerden dolayı, iç gerilmelerin minimum seviyede olması ve böylelikle model dayanımının ve dengesinin yüksek olması, modellerin düşük gevrekliğe sahip olması
- Geometrik sınırların olmaması

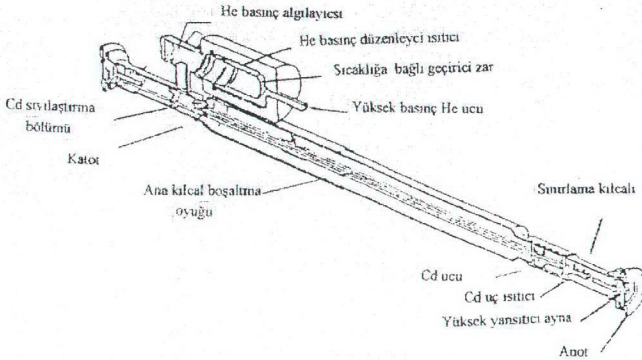
3.6 HPI Sistemlerinde Kullanılan Lazerler

Lazerler bazı HPI teknolojilerinde katılaştırma veya kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Değişik türleri vardır. HPI 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 birçok faktöre bağlıdır. Gaz lazerleri, morötesi lazer ışını için en kullanışlı olan lazerlerdir. Bir gaz lazer sistemi genel olarak üç parça ve alt sisteminden oluşmaktadır.

- Lazer kafası istenilen yayma dalga boylarında optik kazanç sağlaması için bir gaz boşaltma tüpü içermektedir.
- İşe yaramaz haldeki kafanın değiştirilmesi için bir *değiştirici kafa* lazer tüpü tarafından oluşturulmaktadır.
- Tutuşturma, çalışma ve lazer tüpündeki gaz ve metal buhar basıncının düzenleme işlemleri için *güç kaynağı* içermektedir.

3.6.1 He-Cd Lazerleri

SLA sistemlerinde fotopolimer malzemenin katılaştırılmasında kullanılmaktadır. Sistem pozitif bir He-Cd lazer tüpü (Şekil 3.24) içermektedir. Kılcallık çapı yaklaşık 2 mm değerindedir. Sistem, 0,090 A optimum lazer tüp akımında çalışmakta ve kılcallık uzunluğuna göre giriş gücü 3,5 W / cm değerinde olmaktadır. Tüpdeki He basıncı ise yaklaşık 4 mm-Hg değerinde olmaktadır.



Şekil 3.24 Tipik bir He-Cd lazer tüpü kesit görünüşü (Kai ve Fai 1996)

Çıkış gücü ve He-Cd lazerlerin optik gürültüsü, işletme şartlarına, Cd basıncına ve lazer tüp boşaltma akımına duyarlı olmaktadır. Boşaltma akımı güç sağlayıcısı tarafından sabit bir değere düzenlenmektedir. He basıncı bağımsız bir geri beslemeli kontrol alt sistemi ile düzenlenmektedir. Cd buhar basıncı ise lazer tüp boşaltma gerilimi kullanılarak düzenlenmektedir. He-Cd lazerlerinin avantajları; düşük güç harcamaları, uzun ömürlü olmaları ve kurutma-işletme masraflarının düşük olmasıdır.

3.6.2 CO₂ Lazerleri

CO₂ lazer türü, değişik HPİ sistemlerinde ve klasik işlemlerde kesme, kaynak ve malzemelerin sinterlenmesinde kullanılmaktadır. DTM firması malzeme sinterlenmesinde 25 W değerinde bir CO₂ lazer kullanmaktadır. Helisys firması levha malzemenin kesilmesinde 50 W'lık bir CO₂ lazer kullanmaktadır.

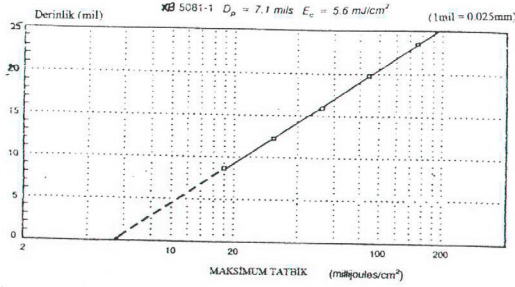
CO₂ lazerler yüksek verime sahiptirler. Yüksek güç yeterlilikleri, düşük kurma ve işletme maliyetleri gibi üstünlükleri vardır. Fakat, fotopolimer reçinelerin katılaştırılması işleminde kullanışlı değildir. Sinterleme ve kesme işlemlerinde verimli çalışmaktadırlar. SLA-500 gibi sonradan gelişen daha genç sistemlerde *argon iyon lazerler* kullanılmaktadır (Kai ve Fai,1996)

3.6.3 Lazer Tarama Parametreleri

Sıvı reçinenin katılaşması, fotopolimer malzemenin yüzeyine odaklanan lazer ışının hareketi sırasında birim alana etkiyen optik enerjiye bağlı olmaktadır.

Foto duyarlılık, foto hız terimi ile birlikte sık sık kullanılmaktadır. Reçinenin lazerle katılaştırma işlemi, lazer ışın çapı, istenilen katıştırma derinliği Cd (mm), lazer nüfuziyet derinliği Dp (mm) ve reçine yüzeyine tatbik edilen lazer enerjisi Ec (mj/cm²) gibi birçok parametreye bağlı olmaktadır. Bu parametreler, istenilen katılaşma derinliğini (Cd) elde edebilmek için gereklidir.

Cd değerleri lazer ile oluşan enerjinin (Emax) logaritmik fonksiyonu olarak değişimi çizilirse, lineer bir eğri elde edilmektedir. Bu eğriye *reçine çalışma eğrisi* denmektedir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Reçine çalışma eğrisi (Jacobs,1992)

Şekil 3.25’ de kullanılan reçine Ciba Geigy XB 5081 –1 reçinesi olmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalara göre, katılaştırılmış çizgi derinliği, tatbik edilen lazer enerjisi ile doğru orantılıdır. Genel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, yaklaşık olarak katılaştırılmış çizgi derinliği oranı aşağıdaki gibidir.

D_p : Lazer nüfuziyet derinliği

C_d : Lazer tatbik edilmiş basit bir çizginin maksimum katlaşma derinliği

$$D_p < C_d < 4D_p$$

Çalışma eğrisinin eğimi, D_p değerini vermektedir. D_p ve E_c değerleri, bir SL reçinesinin aktif bir lazer ışın kaynağına maruz kaldığında, foto duyarlılığın tanımlanmasında temel parametreler olmaktadır. Bunlar yalnız ele alındığında foto hızı tanımlanamamaktadır. Fakat birlikte ele alındığında, temel çalışma eğrisi eşitliğine göre Beer-Lambert yasası kullanılarak C_d ’yi aşağıdaki şekilde tanımlamaktadır.

$$C_d = D_p \ln (E_{max}/E_{min}) \quad (3.1)$$

Tahmini efektif lazer tarama hızı V_s (mm/dk), özel bir reçine için istenilen katılaştırma derinliğini C_d (mm) sağlayabilmek için gerekli hız değeri olmaktadır. Fotopolimer foto hızını tanımlayabilmek için bu parametreleri V_s ’ ye çevirmek gerekmektedir.

$$E_{max} = (2/\pi)^{1/2} [P_L / W_o \cdot V_s] \quad (3.2)$$

Burada P_L , fotopolimer etkiyen lazer gücü (mW) ve W_o ise ışın çapı (mm) olmaktadır. (3.2) denklemi E_{max} için çözümlürse;

$$E_{max} = E_c \exp(C_d/D_p) \quad (3.3)$$

Sonuç olarak, temel stereolitografi hızı eşitliğinde (3.4), reçine parametreleri D_p ve E_c , P_L ve arzu edilen C_d' nin fonksiyonu olarak elde edilmektedir.

$$V_s = (2/\pi)^{1/2} [P_L / W_o \cdot E_c] \exp(-C_d/D_p) \quad (3.4)$$

Tipik bir lazer çapı : $2W_o = 0,023$ mm için (3.4) denklemi,

$$V_s = 69,8 [P_L/W_o] \exp(-C_d/D_p) \quad (3.5)$$

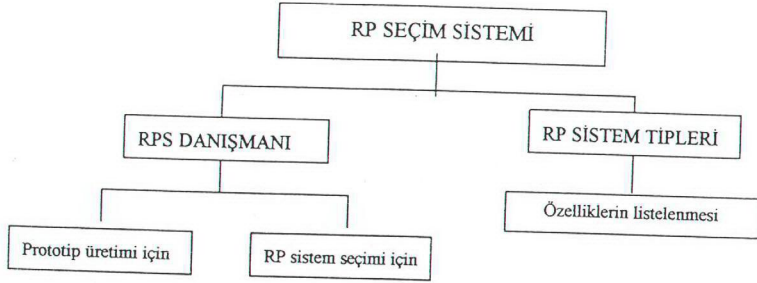
şeklinde düzenlenmektedir.

SLA-250 uygulamalarında kullanılan SL-5170 fotopolimer reçine için $P_L = 30$ mW çıkış gücü (0,15 mm tabaka kalınlığı için) (3.5) denkleminde yerine konulduğunda, $V_s = 83$ cm/sn tarama hızı elde edilmektedir.

3.7 HPI Teknolojilerinin Seçimi

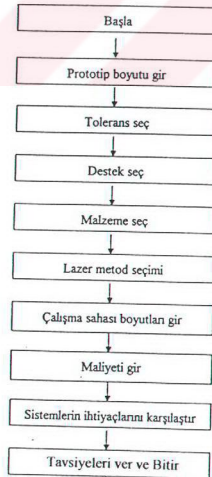
Daha önceki bölümlerde, çok çeşitli HP sistemi olduğu görülmüştür. Bütün bu teknikler farklı kapasitelere ve ihtiyaçlara sahip olmaktadır. Her birinden farklı dayanım, hassasiyet ve yüzey kalitesinde parçalar elde edilmektedir. Prototip imalatında, en uygun yöntemi seçebilmek için, bir kullanıcının deneyim ve bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak kullanıcının tek bir yöntemi ya da makinayı tanıması yeterli değildir, mevcut bütün teknikler hakkında gerekli bilgiye sahip olması da çok zordur. Bu sebeple, bütün makineler üzerinde deneme testler yapılmalı ve en uygun HP sisteminin seçilmesi gerekmektedir.

HP sistemi seçim metodu, tamamıyla kullanıcı isteğine bağlı olmaktadır. Bu geliştirilen sistem de, kurallardan oluşan bir algoritma kullanılmakta ve kullanıcılara tavsiyelerde bulunarak, sorgulamalarına cevap verilmektedir. Anılan bu kural ve bilgiler, kullanıcı ölçümlerinden, araştırma kuruluşlarından ve diğer referanslardan elde edilmektedir. Bu seçimin temel yapısı Şekil 3.26' da verilmiştir.



Şekil 3.26 HP seçim sistemi temel yapısı

Yapılan seçim sistemin ikinci ana modülü, farklı HP tekniklerini tanıtmak ve her tekniğin özelliklerini fotoğraflardan tanımlamak için geliştirilmiştir. Bu modüle yeni bilgiler kolaylıkla eklenebilmekte ve mevcut bilgiler kolay bir şekilde okunabilmektedir. Birinci ana modül olan HPS (Hızlı Prototipleme Seçim) danışma modülü prototip imalatı için ideal metod veya HP sistemi seçiminde kullanıcılara yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. İki modülden oluşur, birincisi prototip seçimi için, ikinci ise HP sistem seçiminde kullanılmaktadır. Kullanıcı bir dizi soruya cevap vererek uygun yöntem ve sisteme ulaşmaktadır. Sorular, prototip boyutları, toleranslar, malzeme, gerekli destek yapı, maliyet ve benzer unsurlardan oluşmaktadır. Prosesin akış şeması Şekil 3.27’ de verilmiştir.



Şekil 3.27 HP sistemi akış şeması

4. HP SİSTEMLERİNDE BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM (BDT) İŞLEMLERİ

HP sistemlerinde, geometrik tanımlamalar BDT (Computer Aided Design-CAD) sistemleri ile sağlanmaktadır. İmal edilecek olan prototipinin ilk önce CAD modeli tasarlanmakta ve model standart formata dönüştürülmektedir. Daha sonra da katı modeldeki geometrik veriden, parça üç boyutlu olarak imal edilmektedir.

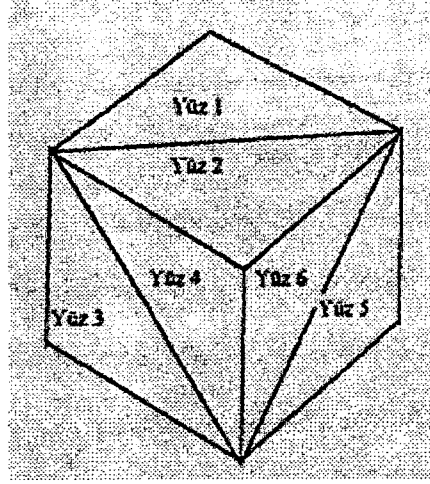
Prototip üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmak istendiğinde, katı model tasarımı üzerinde, yani BDT resmine geri dönüş yapılmakta ve istenen değişiklikler gerçekleştirilmektedir.

4.1 Katı Modelleme

Katı model, sınırlandırılmış bir hacmin geometrik gösterimi olmaktadır. Bu hacmin gösterimi grafiksel olarak eğri veya düz yüzeylerle sağlanmaktadır. Bunun yanında, grafiksel olmayan katı modelde bulunan bir mantıksal ilişki olan topolojik ağaç yapısı şeklinde de gösterilebilmektedir. Topolojik veri, değişik yüzler ve geometrideki yüzeyler arasındaki bağlayıcı ilişkileri tanımlamaktadır.

Özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Yapıcı katı geometri (Constructive Solid Geometry-CSG) modelleyicilerinden küp, koni ve küre elemanlar gibi basit geometrik şekiller kullanılmaktadır. Bunlar işleme bloklarını oluşturmaktadır. Bu bloklar toplama, kesişme ve çıkarma işlemleri kullanılarak birleştirilmektedir. Hiyerarşik olarak CGS ağacı denilen bir yapıda gösterilmektedir.
- Sınır gösterimi (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 tanımlamalardır.
- Yüzleme (faceted), katı modelin düzlemsel yüzeylere bölündüğü tekniktir (Şekil 4.1). Bu yüzeyler üçgen veya dörtgen birimlere (yüzey elemanlarına- fasetlere) bölünebilmektedir. Bunların yoğunluğunun artması lineer olmayan yani eğrisel yüzeylere yaklaşmayı sağlamaktadır.

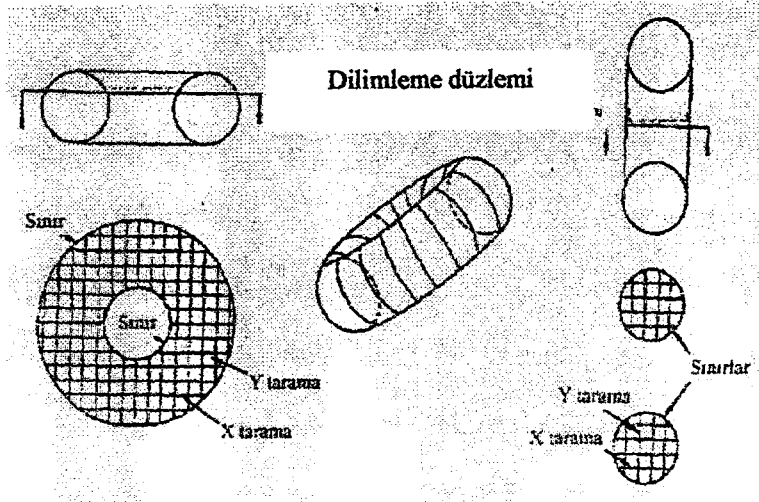


Şekil 4.1 Üçgen yüzey elemanları ile tanımlanmış küp elemanı

4.2. Veri İhtiyaçları

Çok geniş bir kullanım alanına sahip olan HPI sistemlerinin yazılımları, oluşturulacak parçanın geometrisinin kesin verisine ihtiyaç göstermektedir. Model verisi, parçayı, parçanın sınırlarını, kapalı ve açık olan bölgelerini tanımlamaktadır. Şekil 4.2' de bir troidin yüzey elemanları ile tanımlanmış şekli gösterilmiştir.

Herhangi bir katı model, bilgisayar ortamında verilen dilimleme düzlemine göre paralel vektörlerle gösterilmektedir. Bu veri, HPI sistemlerinde parçanın istenilen kesit formunda imal edilebilmesi için gereklidir.

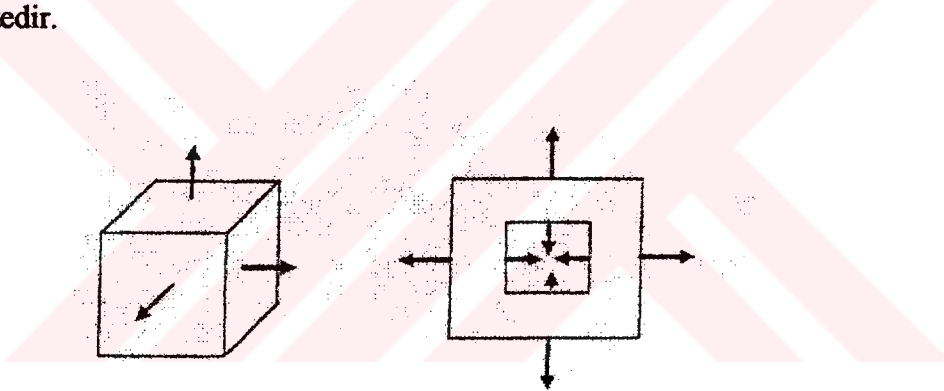


Şekil 4.2 Kapalı modelde dilimleme örnekleri (Kai ve Fai, 1997)

çıkmaktadır çünkü, komşu yüzey yani açık olan yüzeyin hemen yanındaki kapalı yüzey kaybolmaktadır. Fakat HP sistem yazılımların gelişmesiyle nasıl kapalı boşlukların oluşturulacağı tayin edilebilmektedir. Bu durum sağlanmadığı takdirde sistem, sınırlardaki boşluklar tarama vektörlerinin eksik ya da parça dışında kaçmasına neden olabilecek şekilde parça oluşturmayı kötü etkileyecek işlemler yapabilmektedir.

Kapalı sınırlar yalnızca katı cisimleri tanıtmamaktadır. Ayrıca sınır verisi, katı alanların uyumunu da ifade etmektedir.

Yüzey normali, cismin kütle uyumu bilgisini ifade etmektedir. Eğer bu bilgi yanlışsa cidar kalınlıkları sıfır anlaşılabilir veya değişik uyumsuzluklar söz konusu olabilmektedir (Şekil 4.3). Herhangi bir yüzeyin normali, o yüzeyin katı modelde sahip olduğu kalınlık yönünü ifade etmektedir. HP sistemlerinde, katı modelde kalınlığa sahip olmayan kısımlar problem oluşturmaktadır ancak sistemlerin kendi yazılımları katı modelde oluşabilecek bu tür hataları düzeltebilmektedir.



Şekil 4.3. Yüzey normalleri (Kai ve Fai,1992)

4.3 BDT Sisteminde Veri Gösterimi

Gösterim metotları BDT geometrilerinin bir sistemden diğer bir sisteme aktarılmasının tanımlanmasında kullanılmaktadır. Farklı CAD sistem paketlerinden HP sistemlerine geçiş için standart bir ara yüzey gerekmektedir. Kullanılan standartlar her zaman katı modelin ifade edilmesi için yeterli olamamaktadır. Bu nedenle HP sistemleri kendilerine göre standartlar geliştirmişlerdir. Bunlardan birincisi 3D System Firması'nın geliştirdiği STL ara yüzey gösterimi olmaktadır. Bu format, artık tüm HP sistemlerinin giriş standardı haline gelmiştir. NURBS tabanlı veya primitif CGS nesnelere oluşturulmuş yüzeyler, düzlemler ve çizgiler kullanılarak Şekil 4.1' de gösterildiği gibi modeller, yüzlenmiş bir formata dönüştürülmektedir. Düzlemsel olmayan yüzeylerin doğruluk derecesi, yüzeylerin yüzlenmesine kullanılan yüzey elemanlarının sayısı ile kontrol edilmektedir.

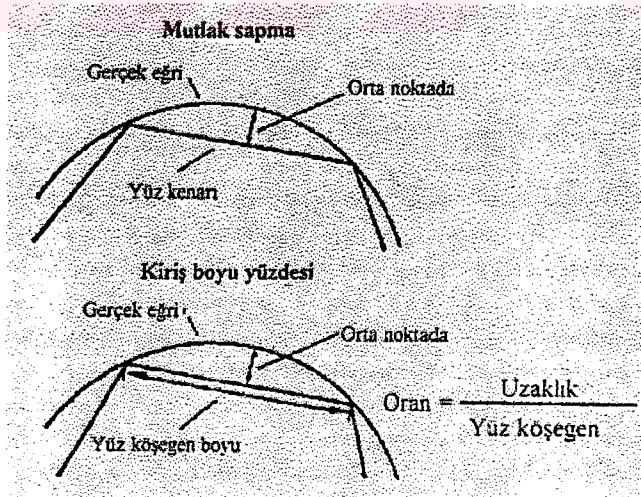
4.4 BDT Parametreleri

BDT geometrisinin bölünmesi sistemden sisteme değişmektedir. I-DEAS' da bu işleme, bir doğru yüzeyden maksimum bir mutlak sapma değeri tayin edilerek başlanmaktadır. Şekil 4.4' de gösterildiği gibi doğrudan eğriye maksimum kiriş yüksekliği ifade edilmekte ve mutlak sapma, bu değer yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Küçük değerler alınarak yapılan yüzleme işlemi gerçek yüzeye yaklaşımı artırmaktadır, fakat bu durumda STL dosyasının büyüklüğü, dilimleme zamanı ve dilimleme dosya büyüklüğü de artmaktadır.

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

SL sistemleri tarafından desteklenen standart birimler inç veya milimetre cinsinde olmaktadır. Tasarımlar başka birimler cinsinden yapılsa bile çeşitli programlar aracılığı ile; 3D View veya Part Manager gibi, birimler inç ve milimetre cinsine dönüştürülmelidir.

Lazer bazlı sistemler için mutlak minimum cidar kalınlığı, lazer tarama çizgisinin genişliği kadar olmalıdır. Bu genişlik lazer ışık demetinin çapına göre 0,178-0,305 mm arasında değişimler gösterebilmektedir.



Şekil 4.4 I-DEAS yüzleme metodu (Jacobs,1992)

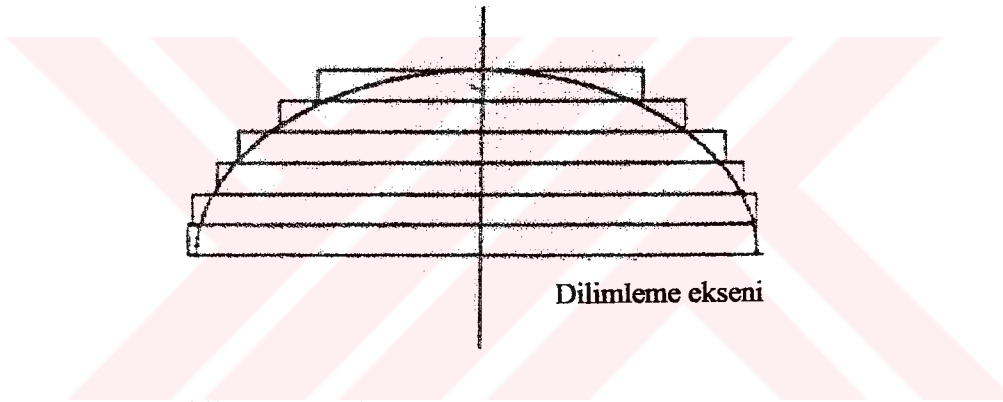
4.5 Parça Oryantasyonu

Parça geometrisindeki değerler x, y, z yönlerinde pozitif değerlere sahip olması gerekmektedir. BDT gerçek sayıları dilimleme işleminde pozitif tamsayılarla çevirmektedir.

Pozitif bir yönlendirme, kullanıcının dilimleme işleminden önce STL dosyalarının yeniden yerleştirilmesinde uygunluk sağlamaktadır.

Dilimleme eksenini boyunca, parçanın eğri yüzeylerinde merdiven adımı etkisi görülmektedir. Her adımın yüksekliği, parçanın o bölümünde kullanılan tabaka kalınlığını ifade etmektedir. Stereolitografi sistemleri bir işleme çevriminde farklı tabaka kalınlıklarında işlem yapabilmeye olanak tanımaktadır (Jacobs,1992).

Açıkça görülüyor ki, z eksenini boyunca geometri yüksekliğini minimize etmekle katman sayısı azalacaktır. Şekil 4.5’ de de görüldüğü gibi eğri yüzeylerin eldesi için yüzeylerin yatay düzlem normaleri, lazer ışın demetine göre oryante edilerek (döndürülerek) gerçekleştirilmektedir ve bu durum da merdiven etkisi yaratmaktadır. Her bir basamak yüksekliği, her bir katman kalınlığına eşit olmaktadır.

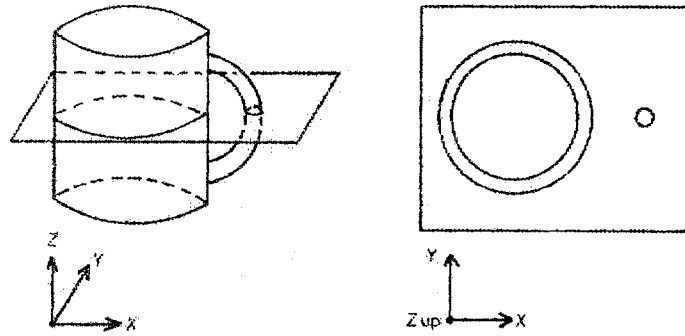


Şekil 4.5. Merdiven adımı etkisi (Kaı ve Faı,1997)

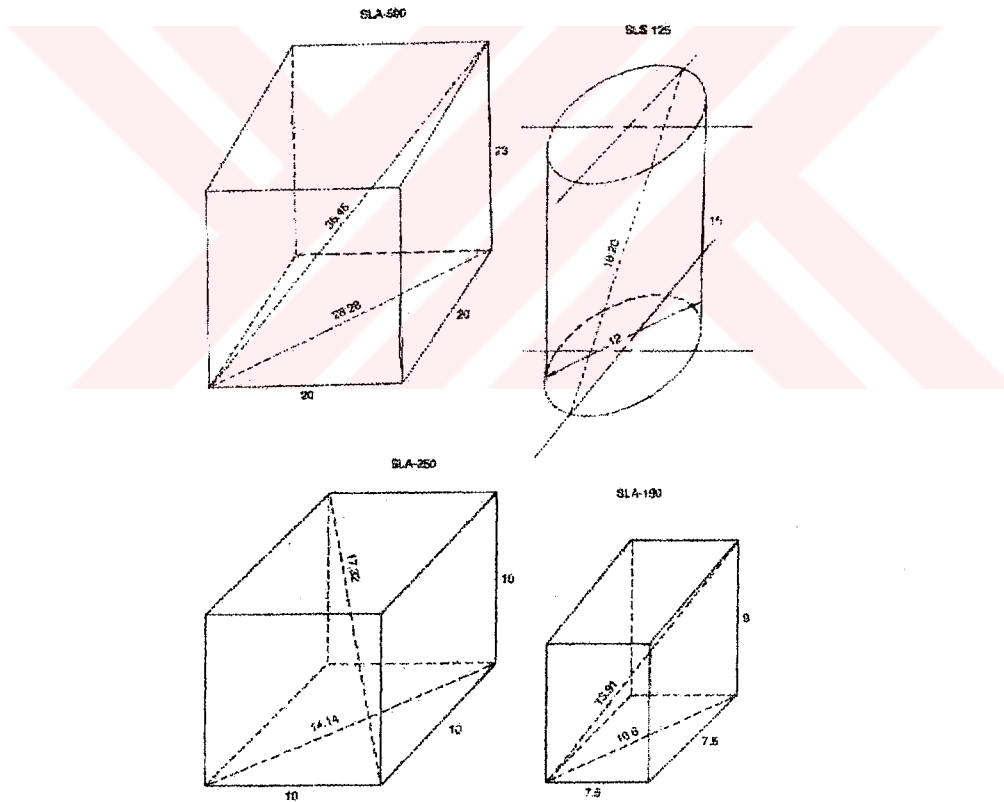
Sıvı bazlı HP sistemlerinde, hapsolmuş (sıkışmış) hacimler sorun yaratabilmektedir. Hapsolmuş ya da diğer bir deyişle sıkışmış hacim, reçine içeren depodan ayrı bir şekilde parçanın belirli bölgelerinde reçinenin tutulmasıdır. Bu bölgeler parça oluşturma hızını yavaşlatacak parametrelere ihtiyaç göstermektedir. Dolayısıyla parça oryantasyonunda bir değişiklikle, hapsolmuş hacimleri elimine etmek mümkündür. Örneğin bir fincanın sağ üst köşesinde bir hapsolmuş hacimli kısım bulunmaktadır (Şekil 4.6). CAD tasarımcısı bu sıkışmış bölgelere, daha sonra bitirme işlemleri esnasında kapatılabilecek şekilde sızmayı sağlayacak delikler oluşturabilmektedir. Bu sızdırma deliklerinin çapı yaklaşık olarak parçadaki en büyük çapın % 10’ u kadar olması tavsiye edilmektedir (Jacobs,1992)

Bir parça büyüklüğü işleme sırasında tanımlanabilmektedir. SL sistemi kübik bir işleme sistemine sahiptir. DTM firmasının SLS’ si ise silindirik bir hacme sahiptir. Dikdörtgen bir hacimde çalışmanın avantajı, Şekil 4.7’ de gösterildiği gibi, hacmin köşegen boyutunun

kullanılabilir. Parçalar belirli bölümlere ayrılıp daha sonra bitirme işlemleri esnasında birleştirilebilmektedir. Parça üzerinde ilave işlemler bu sırada yapılabilmektedir. Bunun için fotopolimer malzemeler veya değişik yapıştırıcılar kullanılabilir.



Şekil 4.6 Hapsolmuş hacim örneği (Jacobs,1992)



Şekil 4.7 Farklı HP sistemlerinin çalışma hacimleri (Jacobs,1992)

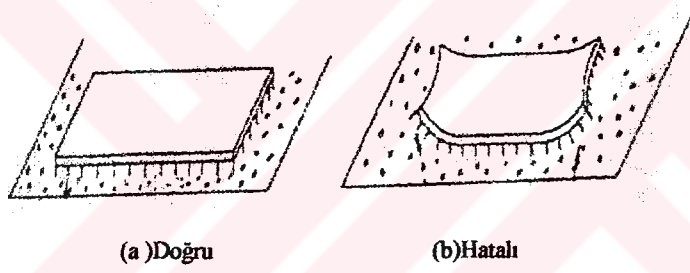
4.6 Destek Yapılar

HP sistemlerinde destekler, makinanın parçayı tutma elemanlarına benzetilebilmektedir (Şekil 4.8) Destek yapılar, CAD sistemlerinde oluşturulmakta ve parça tasarım dosyasından ayrı

4.6 Destek Yapılar

HP sistemlerinde destekler, makinanın parçayı tutma elemanlarına benzetilebilmektedir (Şekil 4.8) Destek yapılar, CAD sistemlerinde oluşturulmakta ve parça tasarım dosyasından ayrı dosyalar şeklinde çıktıları alınmaktadır. Ancak gelişen yazılımlarla, otomatik olarak destek yapıları oluşturmak mümkün olmaktadır. Mühendis veya CAD tasarımcısı tarafından da bu yapılar oluşturulabilmektedir. SL sistemleri için, her parçaya ayrı bir destek yapı gerekmektedir.

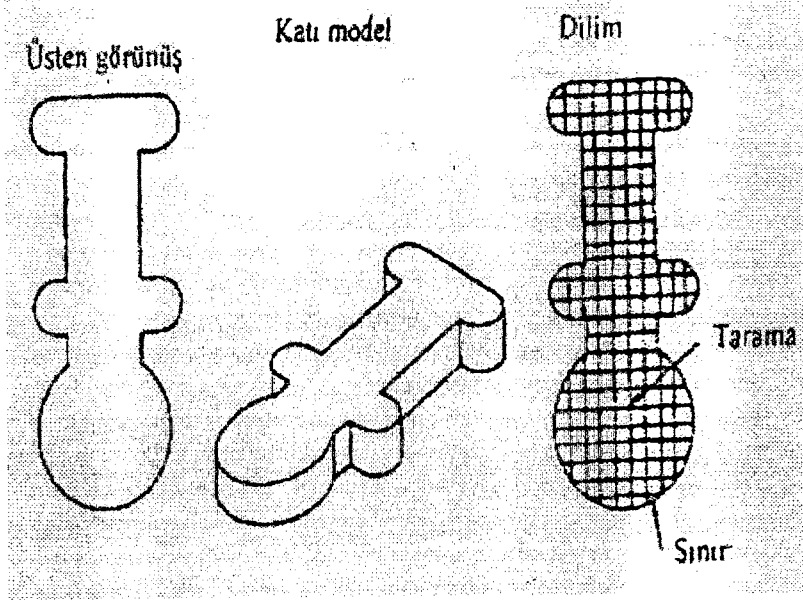
Su hariç tüm malzemeler sıvı fazdan katı faza geçişleri sırasında küçülmektedirler. Bu durum, malzeme yoğunluğunun artması ile kütlede bir değişikliğin olmaması için hacim kaybına yol açmaktadır. Bu da çekme denilen hatanın oluşumuna sebep olmaktadır. Zorlamalı olmayan bir çekme kıvrılmaya neden olarak parça doğruluğunu kötü yönde etkilemektedir. Bu yüzden destek yapılarının gerekliliği açıktır. Şekil 4.8a' da doğru bir destekleme, Şekil 4.8b' de ise yeterince sağlam olmayan hatalı bir destekleme şekli şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Parça ve destek yapının şematik görünümü

SL sisteminde ilk tabaka platforma tutturulmakta ve genelde bu anılan tabaka bir destek yapı olarak kullanılmaktadır. Destek ince cidarlardan oluşturulmuş değişik formlarda olabilen yapılardır. Genelde tek çizgide katılaştırılmış 0.18 mm – 0,3 mm değerleri arası kalınlığa sahip olmaktadır. Tüm desteklerin, işlenmiş olan parçaya 0.5 mm içerisine girmiş olması gerekmektedir. Bu kesişme, desteklerin parçaya fiziksel olarak bağlanmasını sağlamaktadır.

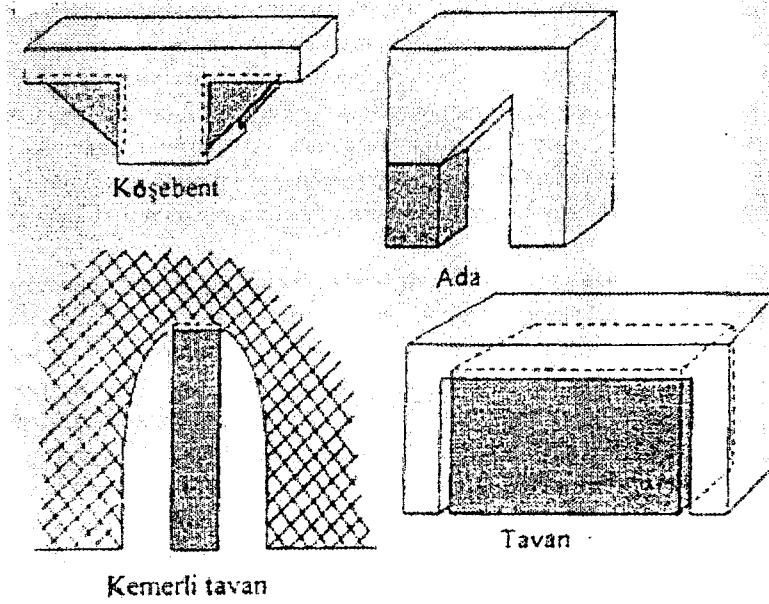
Her SL parçası, platformdan parçaya geçişin ilk tabakalarının köprü oluşturması için temel bir desteğe sahip olması gerekmektedir (Şekil 4.9). Temel destek yapı, süpürmenin meydana gelebileceği bir çakışma tampon bölgesi sağlamaktadır. Bu duruma ek olarak, temel destek, parçanın işlem bittikten sonra platformdan güvenli bir şekilde alınmasını sağlamaktadır. Temel destek parçanın alt tabakasının köşelerini içeren çevresini takip etmelidir. Bu oluşturulan tabakaların kıvrılma eğilimlerini kısıtlamaktadır. Temel destekler katı cisimler olarak tasarlanabilmektedir (Jacobs, 1992).



Şekil 4.9 Katı modelden taranmış destek yapıya geçiş (Jacobs,1992)

Adalar, parçanın diğer bölümleri ile birleşmeyecek olan parça geometrisinin tabakaları olmaktadır (Şekil 4.10). Bunlar platforma ya da parçaya sıkıca bağlanmaktadır, parçanın tabakalarına tutturularak yapının rijit olması sağlamaktadır.

Köşebent olarak adlandırılan güçlü üçgen formundaki destek yapıların platformdan alınması kolay olmaktadır. Köşebentler sıkı bir birleşme için 0.38 mm kadar parça içine girmektedirler.



Şekil 4.10 Farklı destekleme türleri (Jacobs,1992)

4.6.1 Köşebentler (Kb)

Köşebentler, aşırı yüklenmiş bölgeler için kullanılmaktadır. İşleme sırasında yüklenmiş alanlar için bir yüzey sağlamak amacıyla, ilgili bölgedeki dikey cidara tutturulmaktadır. Temizlenmesi kolaydır. (Şekil 4.11 a)

4.6.2 Özel olarak tasarlanmış kenarlar (Ök)

Desteklenmemiş ve köşebentlerin ulaşamadığı aşırı yüklenmiş alanların kenarlarına destek sağlanması için tasarlanmış destekleyici yapılar olmaktadır (Şekil 4.11 b).

4.6.3 Kaburga yapılar (Ky)

Kaburga yapılar, dar veya keskin bir kenar için, bir kenarın merkezinden kenar boyunca olmak üzere tasarlanan bir duvardır. Yapıdaki çapraz kısımlar dengeyi sağlamak amacıyla konulmaktadır.

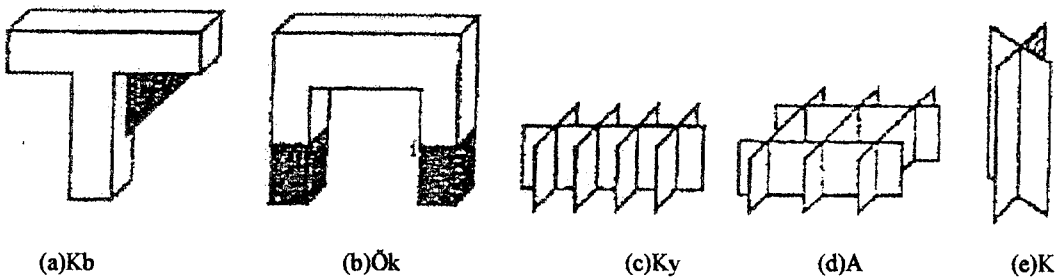
(Şekil 4.11c).

4.6.4 Ağlar (A)

Geniş desteklenmemiş alanların iç kısımlarının desteklenmesi için kullanılan kesişmiş duvarlardır (Şekil 4.11d).

4.6.5 Kolonlar (K)

Kolonlar, ada ve diğer küçük desteklenmiş alanlara destek sağlamak için kullanılmaktadır. Bir kolon iki duvarın "+" formunda bir araya gelmesiyle oluşturulmaktadır (Şekil 4.11e) (Kai ve Fai,1997).



Şekil 4.11 Destek yapılarının şematik resmi (Jacobs,1992)

5. HP YAZILIMLARI

5.1 Verinin Hazırlanması

HP sistemlerinde karşımıza ilk çıkan sorun; ne şekilde nesnelere oluşturabileceğimizdir. İkinci sorun ise oluşturmak istediğimiz parçaları nasıl tanımlamamız gerektiği olmaktadır. HPİ sistemlerinde veri CAD sistemlerinden elde edilmektedir. CAD paketleri bir çok farklı formdan oluşturulmaktadır;

- İki boyutlu: Veri iki boyutlu noktalar, iki boyutlu çizgiler, iki boyutlu daireler vb. formdan meydana gelmektedir.
- İki buçuk boyutlu: Bu formda iki boyutlu çizimler birbirlerine bağlanmaktadır.
- Üç boyutlu tel çerçeve: Veri üç boyutlu noktalar, çizgiler, daireler formunda toplanmaktadır.
- Üç Boyutlu yüzeyler: Bu formdaki çizimler sıfır kalınlığı olan ve ağırlıksız esneyebilen kartlardan oluşmuş parçalar olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Üç boyutlu katı: Bu formda veri, küre, silindir, koni gibi Yapıcı Katı Geometrilere (Constructive Solid Geometries-CGS) formatında toplanmakta ve CAD paketi olarak tanımlanabilmektedir.

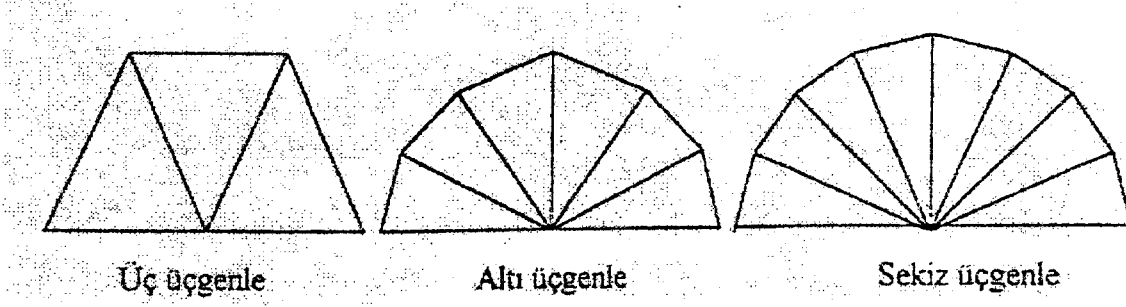
HPİ sistem çıktıları katı nesnelere meydana geldiği için, CAD sisteminden bu objeleri tanımlamak amacıyla en çok üç boyutlu katı modelleme kullanılmaktadır. Ancak, bu software paketleri CAD sistemlerinin yüzde olarak çok bir paya sahiptir. Bu nedenle HPİ sistemi ayrı bir formata ihtiyaç duymaktadır.

HPİ sistemi için kullanılan bu formatın adı "Stereolitografi" dosya (STL) formatıdır. Bu standart, birbirine bağlı üç boyutlu üçgenlerden meydana gelmektedir.

5.2 Veri Analizi

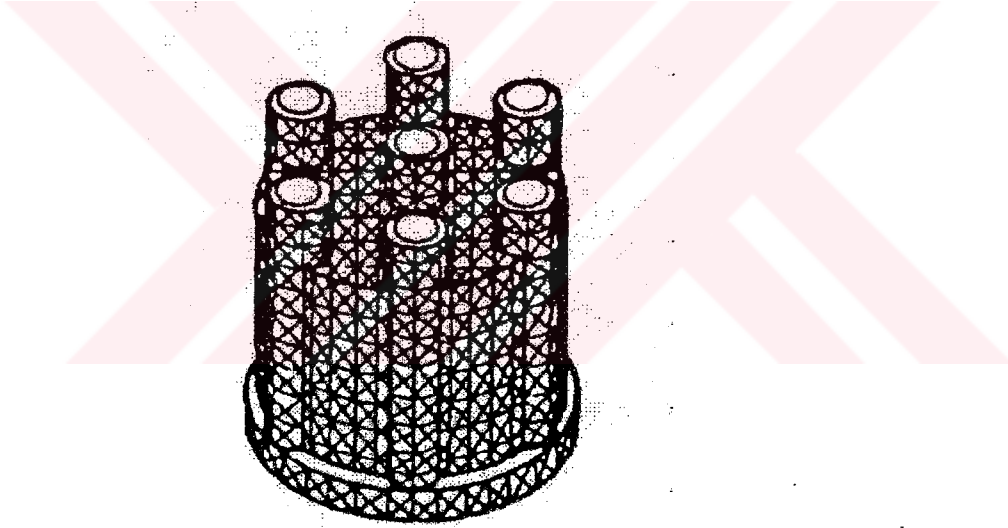
CAD sisteminde, bilgisayar monitörü üzerinde hatalar tanımlanamayabilmektedir. STL dosyaları, Eiffel Kulesi'ni andıracak şekilde, parçanın birbirine bağlı üç boyutlu üçgenlerin sıkıştırılmış şekli olarak tanımlanmaktadır. Her ne kadar üçgen iki boyutlu bir obje olarak ifade edilse de, "üç boyutlu" terminolojisi üçgenin x, y, z uç noktalarını ifade etmektedir.

Şekil 5.1' de yarım bir daire formundaki parçanın üçgen yüzey elemanları (fasetler) ile nasıl ifade edilebileceği gösterilmiştir.



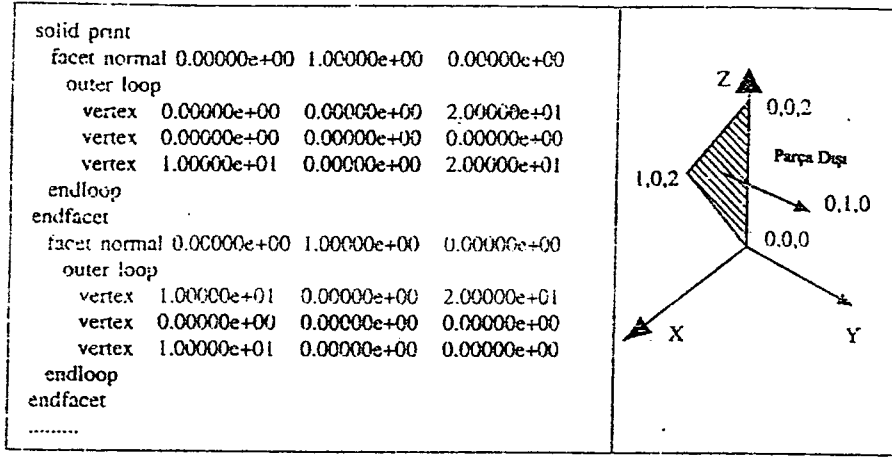
Şekil 5.1 Yarım daire formundaki nesnenin üçgen yüzey elemanlarına bölünmesi

Şekil 5.2' de de bir distribütör kapağının katı modelinin üçgen fasetlere ayrılmış şekli görülmektedir.



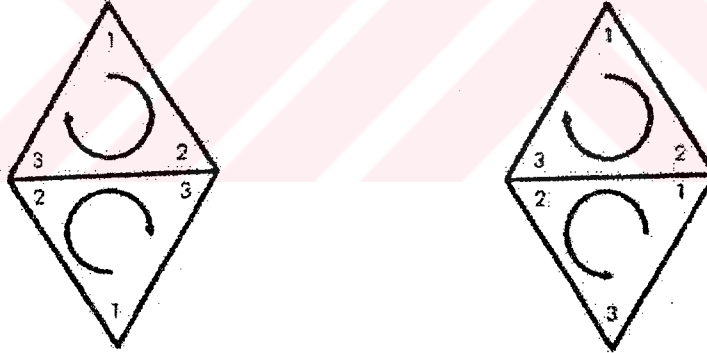
Şekil 5.2 Dilimlenmiş distribütör kapağı modeli

STL dosyasındaki bir üçgen, diğer üçgenlerin köşeleri ile komşu olmalıdır. Daha da ötesi, üçgenlerin hangi kenarlarında ağırlık olduğu ve yerleşimleri ile ifade edebilmelidir. Dolayısıyla STL formatı, her üçgenin köşe noktalarının ve yüzeye ait yüzey normali bilgisini içermektedir.



Şekil 5.3 Tipik bir STL dosyası (Kai ve Fai, 1997)

Üçgenin köşe noktaları x , y , z koordinatları olarak tanımlandığı belirtilmiştir. Birbirine komşu iki üçgen elemanda yanlış normaller tanımlanması, STL dosyasında problemlere yol açabilmektedir. Şekil 5.4' de doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu gösterilmiştir. Normaller sağ el kuralına göre tespit edilmektedir. Üçgenin içersisindeki numaralar STL dosyasında listelenen koordinatların üçgende ki köşe numaralarını göstermektedir.



Şekil 5.4 Doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu

Doğru bir STL dosyasında her üçgen eleman, her kenar boyunca tek bir tane komşuya sahip olmaktadır. Üçgenlerin yalnızca genel kenarlarında ve tepe noktalarında kesişmelerine izin verilmekte, böylece modelin iç kısmını dış kısımdan ayırmak mümkün olmaktadır.

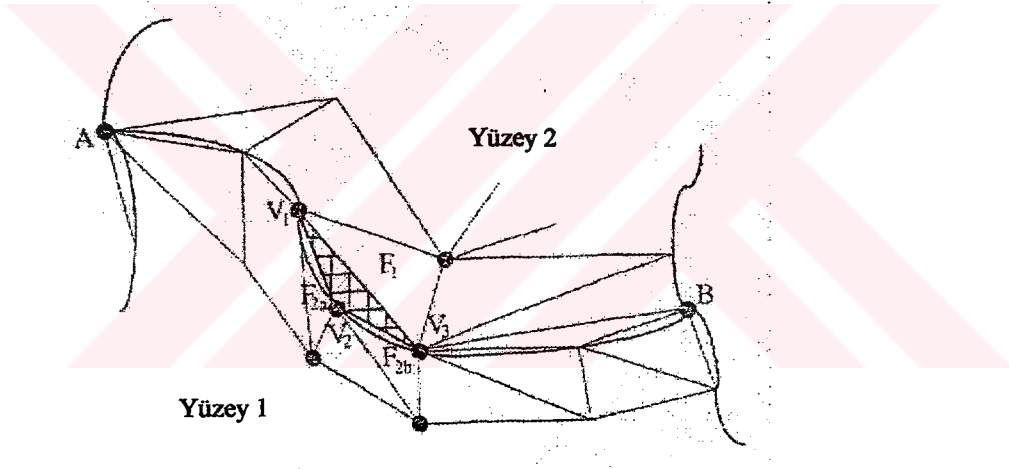
5.3 STL Dosya Hataları

HPI sistemlerinin yazılımları ve önceki konularda bahsedilen yazılımın CAD modülleri, STL formatından herhangi bir parçanın katı modelinin üçgen dilimlere bölünmüş iken yanlış

gösterimleri düzeltilebilecek yapıda olmaktadır. Bu yazılımlarla hataların bir çoğu düzeltilebilmektedir. Bu hatalar;

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

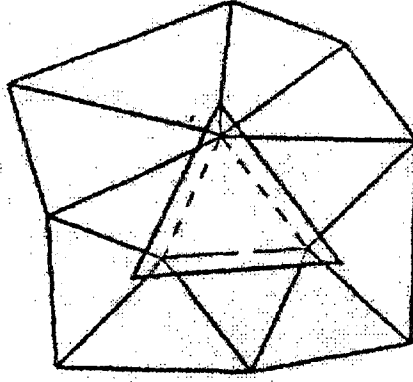
Problemlerin temelinde, yüzey kesişmeleri, numerik hataların kontrolü ve kesip düzeltilen yüzeylerin dönüştürülmesinde karşılaşılan zorluklar görülmektedir. Geniş eğriliğe sahip yüzey dönüştürmeleri yüzeyler arasındaki kesişimlerde, aralıklarda model kenarları boyunca olan deliklerde hatalara sebep olmaktadır. Şekil 5.5' de kayıp yüzeylerden dolayı oluşan boşluklara bir örnek verilmiştir.



Şekil 5.5 Kayıp yüzeylerden dolayı oluşan boşluklar (Karı ve Faı, 1997)

Geometrik olarak dejenere olmuş bir yüzey ise bütün vektörlerin farklı olmasına rağmen, bütün yüzey kenarlarına doğrusal olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Üst üste binmiş yüzeyler nümerik hatalardan dolayı meydana gelebilmektedir. Şekil 5.6' da bir örnek verilmiştir.

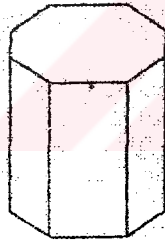
Modellerin, üçgen yüzey elemanları ile tanımlanmasındaki temel kural; üçgenin her bir yüzeyinin, her bir kenarında sadece bir komşu yüzey olmalıdır (Famieson,1995).



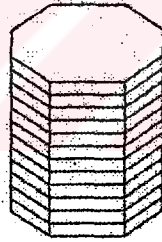
Şekil 5.6 Üst üste binmiş yüzeyler

5.4 Geçerli ve Geçersiz Model

Geçerli bir model, önceki bölümde belirtilen hataların oluşmadığı modeller olmaktadır. Kabul edilebilir bir modelin şematik resmi Şekil 5.7a' da gösterilmiştir. İki boyutlu katmanla ayrılmış şekli ise Şekil 5.7b' de verilmiştir. Şekil 5.7c' de de lazerin tarama çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 5.7 (a) Geçerli dönüştürülmüş üç boyutlu bir model



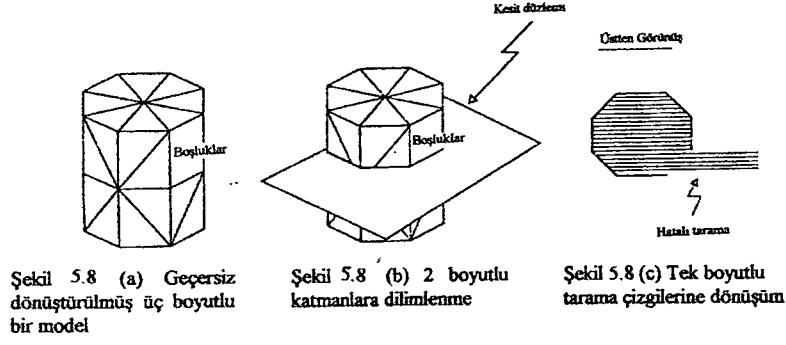
Şekil 5.7 (b) 2 boyutlu katmanlara bölünme



Şekil 5.7 (c) Tek boyutlu tarama çizgilerine dönüştürme

Şekil 5.7 Geçerli dönüştürülmüş model örnekleri

Geçersiz modellerin şematik resmi ise Şekil 5.8' de verilmiştir. Parçada tayin edilen hatanın sebebi ise görüldüğü gibi boşluklardır. Modele üst kesitten bakıldığında ise bu boşluğun sebebinin tarama hatası olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.8 Geçersiz dönüştürülmüş model

5.5 Dosya Dönüştürücüleri

5.5.1 IGES formatı

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) dönüştürücü dosyası 1981 yılında Amerikan Ulusal Standardı olarak oluşturulmuştur. CAD modellerini tanımlayabilen bir dosyadır. IGES, yüzey modellenmesi, yapıcı katı geometri (CGS- constructive solid geometry) ve sınır tanımlamalarını (B-rep-boundry representation) içermektedir.

Ancak her yönden mükemmel değildir. CAD sistemlerinin dönüştürülmesi amaçlı kullanılan IGES, hızlı prototipleme sistemleri için gereksiz birçok bilgi içermektedir. Ayrıca SLA da ihtiyaç duyulan destekleyici yapılar yoktur.

5.5.2 HPGL formatı

HPGL (Hewlett- Packard Graphics Language) formatında, veri tipi doğrular, çemberler gibi iki boyutludur. HPGL formatının özelliği, CAD sistemlerinde bir ara yüzey olarak kullanılması ve dilimlemeye ihtiyaç duymayan iki boyutlu geometrik veri olmasıdır.

Ancak iki temel dezavantajı vardır; verilerin iki boyutlu olmasından dolayı, dosyalar birbirine ekli değildir ve ayrılan yüzlerce küçük dosya mantıklı isimlere ve transfere gerek duymaktadır. İkinci dezavantaj olarak destek yapının CAD sistemde üretilip ve yine aynı yolla dilimlenmesinin gerekliliğidir.

5.5.3 CT formatı

CT (Bilgisayarlı Tomografi) tarama verisi, tıbbi görüntüleme için kullanılabilmektedir. Format, CT tarama makinesinden diğerine transferinde kullanılmaktadır. Tarama verileri üç boyutlu noktaların temel yapısı olarak üretilmektedir. CT taramasından elde edilen veriler SLA üzerinde kafatası, diz gibi kemik modellerin yapımı için kullanılmaktadır.

5.5.4 SLC formatı

SLC formatı, 3D Systems tarafından geliştirilmiştir. SLC (Stereolit Kontour) dosya formatı, STL formatıyla tanınan birçok problemin çözüldüğü bir veri dosyasıdır. Bilindiği gibi bir STL dosyası bir CAD modelinin üçgen yüzey elemanları halinde tanımlanmasından oluşmaktadır. Daha düzgün boyutlu parçalar imal etmek için artırılan üçgen sayısı, STL dosyasının çok yer kaplamasına ve parça dilimleme hesapları için gerekli zamanı artmasına sebep olmaktadır.

SLC dosya sistemi bu problemleri çözmek için dönüştürülmüş bir STL modeli kullanmak yerine direkt olarak bir CAD modelden iki boyutlu fasetleri alma yolunu uygulamaktadır. 3D Systems' e göre bu yöntemle STL' deki boyut hassasiyetinden daha iyi değerler elde edilmektedir. Bu yeni yaklaşımla beraber çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Öncelikle bir CAD modelin doğrudan yüzey elemanlarına bölünmesi, her zaman hassas bir yöntem değildir. Çünkü her elemanın konturları geometrinin bire bir aynısı değildir. İkinci olarak fasetlere bölme işlemi, STL' deki gibi çok daha fazla karmaşık hesaplamalar gerekmektedir ve bu da zaman tüketimini arttırmaktadır.

5.5.5 STL (Stereolithography) Formatı

STL dosya formatı, hızlı prototipleme yöntemlerinin, BDT dosyalarının okunabilmesi için geliştirilmiştir. STL dosyası, bir parçanın dış yüzeylerinin üçgen elemanları ile kaplanmış gösterimidir. Ashley' e (1994) göre, bu formattaki gösterim, her yüzeyin tam olarak o yüzeyi ifade edebilen üçgen yüzey elemanları ile tanımlanmasıdır. STL dosya formatının ASCII formu çok yer kapladığından genel kullanımlara uygun değildir. ASCII dosya format yapısı aşağıdaki gibidir.

solid name

facet normal $n_x n_y n_z$

outer loop

vertex $v1_x v1_y v1_z$

vertex $v2_x v2_y v2_z$

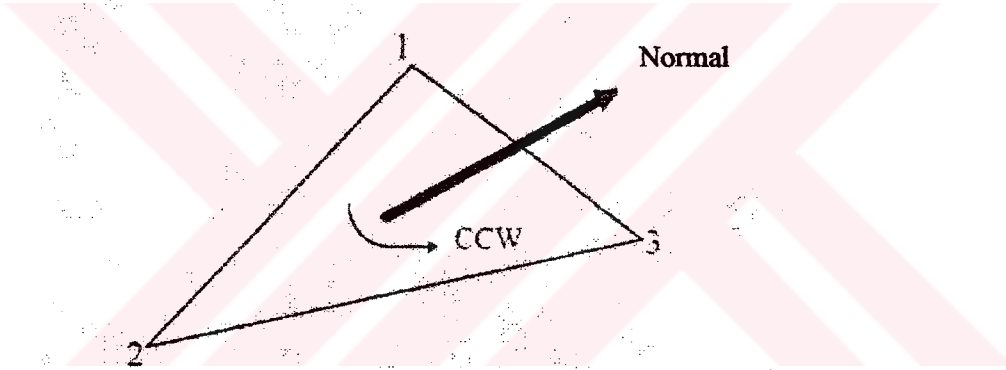
vertex $v3_x v3_y v3_z$

end loop

end facet

endsolid name

STL formatı, her üçgenin köşe noktalarının ve yüzeye ait normali bilgisini içermektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Bir üçgen elemanın köşe noktaları ve doğru normali

Üçgenin köşe noktaları x,y,z koordinatları olarak tanımlanmaktadır. STL dosyasındaki her kenar başka bir kenarla çalışmak zorundadır.

Kai ve Fai' nin da (1996) belirttiği gibi, birbirine komşu iki üçgen elemanda yanlış normaller tanımlanması STL dosyasında problemlere yol açabilmektedir. Daha önceden de Şekil 5.4' de doğru ve yanlış üçgen oryantasyonu gösterilmiştir. Normaller sağ el kuralına göre tespit edilmektedir. Üçgenin içersindeki numaralar STL dosyasında koordinatların üçgendeki köşe numaraları göstermektedir. Doğru bir STL dosyasında her üçgen eleman, her kenar boyunca tek bir tane komşuya sahip olmaktadır. Üçgenlerin yalnızca genel kenarlarında ve tepe noktalarında kesişmelerine izin verilmektedir. Bu şartlar altında modelin iç kısmını dış kısmından ayırmak mümkün olabilmektedir.

6. HP SİSTEMLERİNİN İMALAT UYGULAMALARI

6.1 Plastik Kaplanmış Parçalar

Plastik kaplanmış parçaların eldesindeki amaç, gerçek parçalara çok benzeyen dayanımı çok daha yüksek çeşitli prototip kopyaları elde etmektir.

6.1.1 Silikon kalıplama ile vakum döküm

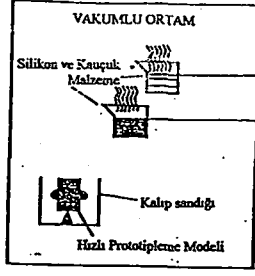
Silikon kalıplama ile plastik prototip eldesi çok uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Avantajları,

- Silikon kalıp oyuğuna, esas model detayları yüksek hassasiyetle kopyalanabilmektedir.
- Kalıp ayırımında gerekli olan kaba işler azaltılabilmektedir.

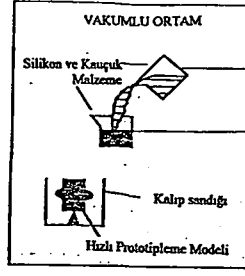
Anılan unsurlar, sert kalıplarda problem olarak karşımıza çıkmaktadır. İşlemi zorlaştırmakta ve zaman almaktadır. Silikon kalıplama da ise bu sorunlar elimine edilmektedir.

İşlem aşamaları;

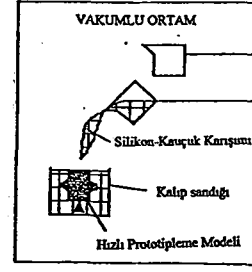
- Vakum altında silikon kalıplamanın ilk aşaması, iki bileşenli silikon karışımların gazlarının vakum odasında alınmasıyla başlamaktadır (Şekil 6.1.1(a)).
- Gaz alma işleminden sonra silikon bileşenleri belirli oranda karıştırılmaktadır (Şekil 6.1.1 (b)).
- Gaz alma ve karıştırma işlemlerinden sonra, elde edilen karışım kalıp kutusu içerisindeki HP model üzerine dökülmektedir (Şekil 6.1.1(c))
- Kalıp, gaz alma işlemine maruz bırakıldıktan sonra ısı işlem fırınına sokulmaktadır. (Şekil 6.1.1(d))
- Katılaştıran kalıp bölme yüzeyinden ayrılmakta, master model olarak kullanılan prototip kalıptan alınmaktadır.
- Ayrılan kalıp yeniden tek parça haline getirilmektedir.
- Üretan ve katalizör gaz alma işlemine maruz bırakılmaktadır (Şekil 6.1.1(e)).
- Üretan ve katalizör vakum odasında karıştırılmaktadır (Şekil 6.1.1(f))
- Karışım kalıp boşluğuna dökülmektedir (Şekil 6.1.1(g))
- Kalıp vakum odasından alınarak, 140-150 C' de iki – üç saat arasında ısı işlem fırınında bekletilmektedir (Şekil 6.1.1(h)).



Şekil 6.1.1 (a)



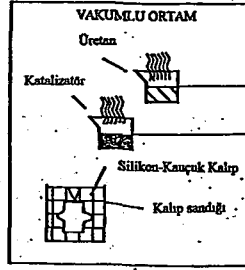
Şekil 6.1.1 (b)



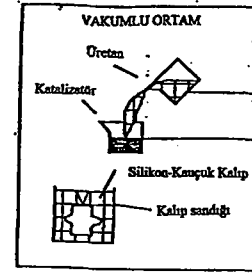
Şekil 6.1.1 (c)



Şekil 6.1.1 (d)



Şekil 6.1.1 (e)



Şekil 6.1.1 (f)



Şekil 6.1.1 (g)



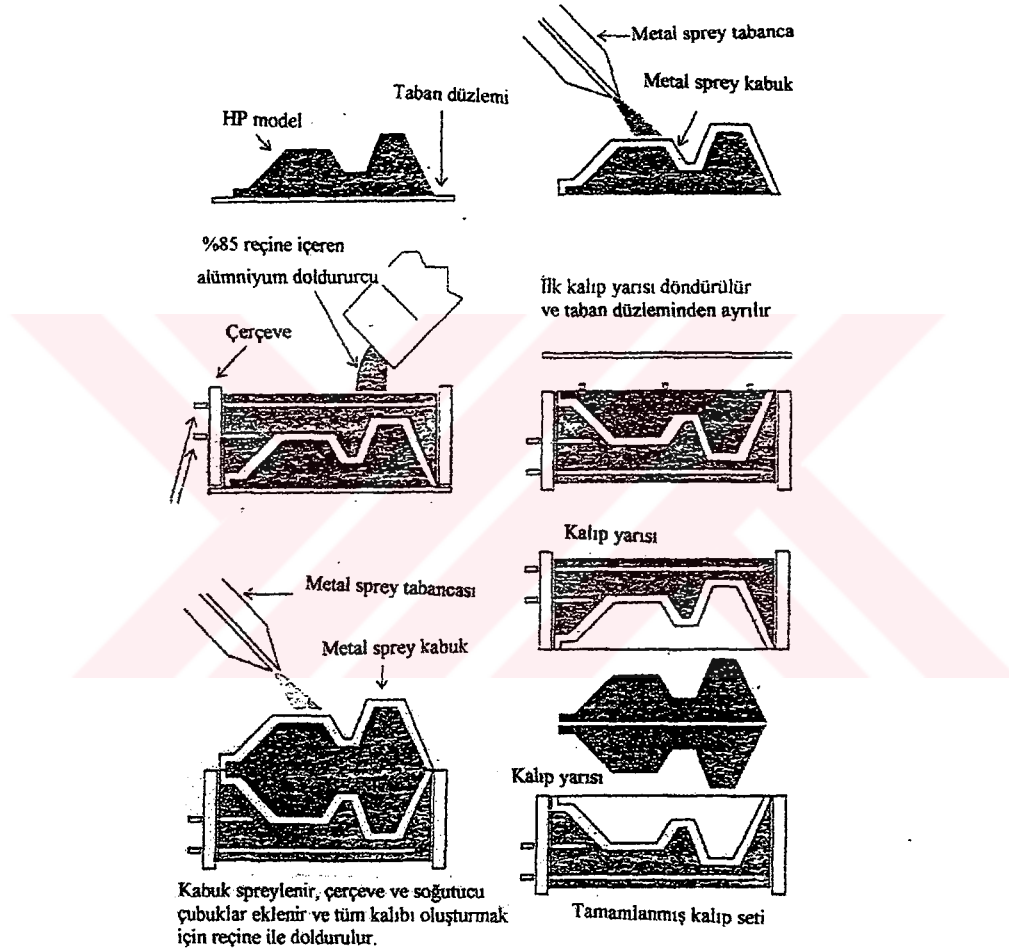
Şekil 6.1.1 (h)

Şekil 6.1 Silikon kalıplama aşamaları (Jacobs,1992)

HP parçaları, plastik silikon kalıplarını oluşturmada model olarak kullanılabilir. Detaylı bilgi tezin uygulama bölümünde verilmektedir, fakat kısaca özetlenirse, HP yönteminden elde edilmiş olan model, vakum altında kalıp kutusuna (havuzuna) yerleştirilmekte ve sıvı silikon, havuz içine dökülmektedir. Silikon katılaştıktan sonra, silikon blok dikkatlice kesilmekte ve HP model çıkarılmaktadır. Kalıp oyuğuna iki bileşenden oluşan ürethan dökülmekte ve işlem tamamlanmış olmaktadır. Dvorak' a (1993) göre de, proses oldukça ucuz olmakta ve silikon kalıpta aşınma olmaksızın 15-30 döküm gerçekleştirebilmektedir. Aşınma meydana gelse dahi orjinal HP modeli ile çok rahatlıkla yeni bir kalıp oluşturabilmektedir.

6.1.2 Metal spreyleme

Hızlı prototip modellerin metal spreyleme yönteminde kullanılması oldukça sık karşılan bir uygulama yöntemidir. İşlem manuel olarak bir spreyleme tabancası ile gerçekleştirilmektedir. İki tel arasında bir elektrik arkı oluşturulmakta ve böylece metal teller ince damlacıklar halinde eriyebilmektedir. Sıkıştırılmış hava üflenerek damlacıklar yaklaşık olarak 0.5 mm' lik metal tabakalar halinde parça üzerine yayılmaktadır. Kullanılan parametreler; voltaj 19-21 volt, akım 100 amperdir. Yöntemin şematik resmi Şekil 6.2' de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Metal ark spreyleme sistemi (Jacobs, 1992)

6.2 Döküm

Metal dökümünde, işlem genellikle bir alaşım malzemesi ile gerçekleştirilmektedir. Alaşım ergitilmekte ve daha sonra sıvı metal kalıp boşluğunun şeklini alacak şekilde dökülmekte ve soğutulmaktadır. HP parçalar, bu metal kalıpların oluşturulmasında model ihtiyacını karşılamak amaçlı aktif olarak kullanılmaktadır.

6.2.1 Kum kalıba döküm

Alışlagelmiş metal, ahşap ve plastik modeller yerine HP parçaları model olarak kullanılmaktadır. Prototip yani model, kum kalıplara yerleştirilmekte ve üzerine kum dökülmektedir. Bu aşamadan sonraki işlemler önceki yöntemlerde olduğu gibi kalıplama prensiplerine uygun bir şekilde devam etmektedir.

6.2.2 Hassas döküm

Metal dökümünde, hassas döküm yöntemi önemli bir kaplama prosesi olmaktadır. Hassas döküm modelleri HP parçalardan yapılabilmektedir. Parça genellikle reçine, köpük veya kağıt gibi kolay eriyen ve buharlaşan malzemelerden olmaktadır.

Model, üzerinde bir kabuk veya kaplama oluşturmak amacıyla sulu seramik bileşenin içine yerleştirilmektedir. İstenen kalınlık oluşana dek bu işlem devam etmektedir. Kabuğun modelden ayrılması sağlandıktan sonra döküm işlemi için seramik boşluk hazır olmaktadır. Eritilmiş metal, kalıp boşluğuna dökülmektedir. Son olarak kalıbın içinden parçayı almak için kabuk kırılmakta ve döküm parça, HP parçanın model olarak kullanılmasıyla elde edilmiş olmaktadır.

7. HPİ SİSTEMLERİNİN ENDÜSTRİDEKİ YERİ

7.1 Uçak Endüstrisindeki Yeri

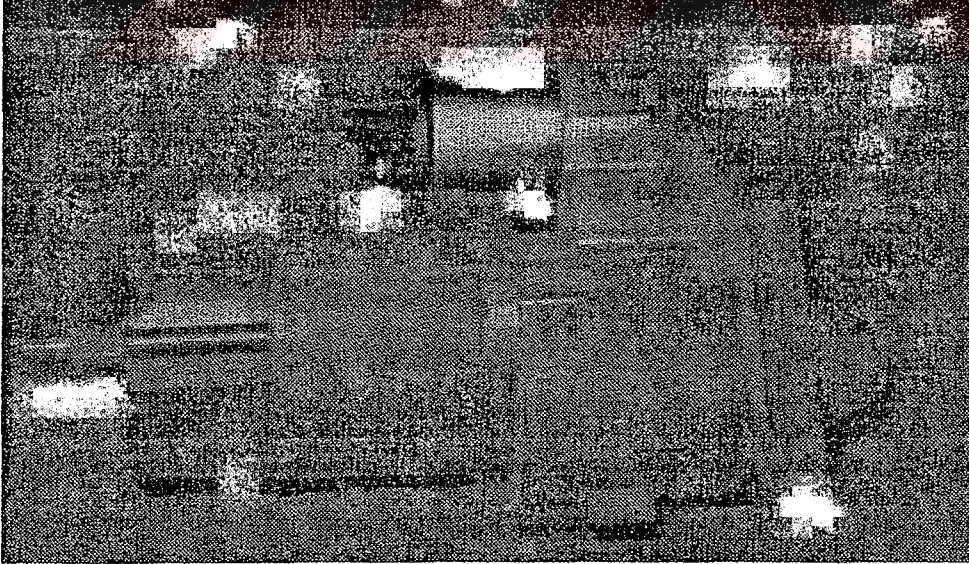
- Uçak endüstrisinde Jetliner' ın jeneratör dizaynı gibi büyük parçaların dizaynı ve imalatı oldukça zor olmaktadır. Bir jeneratör 1200 iç parçadan oluşmaktadır. Böyle karmaşık parçaları iki boyutlu çizimlerden canlandırmak oldukça zordur. Fakat, HP teknolojileri ile iki hafta içinde, anılan bu karmaşık parçaların prototipini elde etmek mümkün olmuş ve daha sonra prototip halinde parçaların montajı sağlanıp hata olup olmadığı gözlemlenebilmiştir.
- Allied Signal firması, 3D Systems' in "Quick Cast" yöntemi ile turbo Fanjet bileşenlerini imal etmiştir. HP sistemi ile elde edilen parça, model olarak kullanılmış, STL teknolojisi ile hassas döküm modelleri direkt imal edilmiştir.
- Sundstrand Power Systems (SPS) firması, askeri ve ticari uçakların motorlarının gaz türbinlerinin imalatı için HP sistemlerini seçmiştir. Yüksekliği 250 mm, çapı 300 mm ve cidar kalınlığı 1.5 mm olan bu parçaların klasik yöntemlerle imalatı oldukça maliyetli ve zor olmaktadır. SPS firması, DTM' in Seçici Lazer Sinterleme (SLS) sistemini kullanarak prototipler oluşturmuş ve daha sonra bu prototipleri hassas dökümde model olarak kullanmıştır (Jacobs,1992).

7.2 Otomotiv Endüstrisindeki Yeri

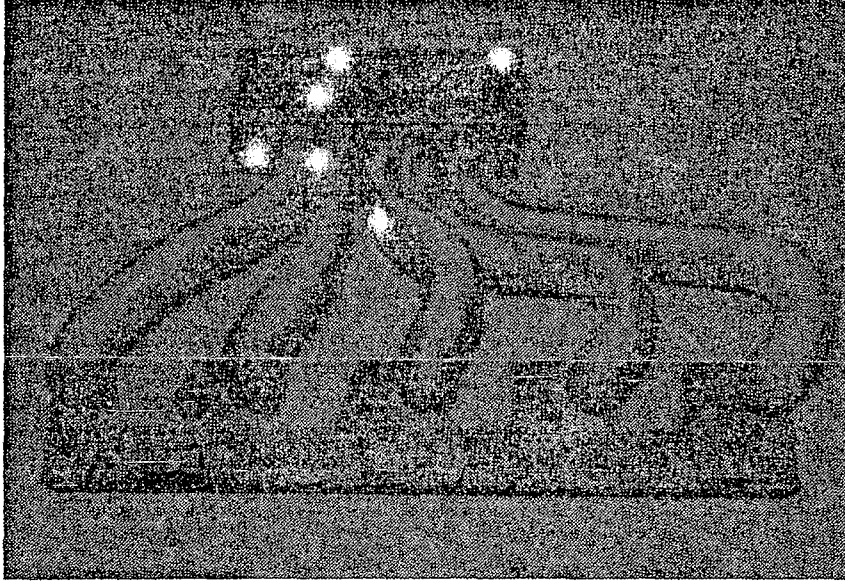
- Schmidt' in (1991) belirttiği gibi, Volkswagen, Helysis' in LOM yöntemini kullanarak Golf ve Passat modelleri için dişli kutusu prototipinin imalatını gerçekleştirmiştir. CAD modeli karmaşık bir parça olan dişli kutusunun görsel olarak hayal etmek oldukça zordur. Klasik yöntemlerle prototipinin eldesi ise pahalı ve zaman almaktadır, bu sebeple Volkswagen Firması' da HP teknolojisini kullanmıştır. Dişli kutusunu bütün olarak LOM makinasında tek aşamada oluşturmak mümkün olmadığı için, beş parça halinde imal edilmiş ve daha sonra da montajı sağlanmıştır. Tüm parçanın oluşturulması ve montajı 10 gün almıştır.
- Mercedes-Benz' de SL yöntemini kullanarak yeni motor dizaynları gerçekleştirmiştir. İlk projeleri dört silindirli motor bloğunun prototip imalatı olmaktadır. SLA' nın Quick Cast yöntemiyle elde edilen modelden, motor bloğun dökümü gerçekleştirilmiştir. Gerekli veri, 3D Systems' in merkezi Darmstadt' a gönderilmiş ve 96 saat içinde tam ölçekli hassas döküm modeli elde edilmiştir. Daha sonra model 300x300x457 (mm³) motor bloğu

halinde A356-T6 alüminyum döküm yolu ile sadece beş haftada tamamlanmıştır. Klasik yöntemlerle 18 hafta sürecek olan bu işlem, altı haftada (son işlemler dahil) tamamlanmış ve 150.000\$ kar edilmiştir.

- Avrupa'ya ihraç edilen turbo diesel Jeep Cherokee starteri Fransızlar tarafından tekrardan tasarlanmıştır. Fransız grup, tasarlanan starterin motora uyup uymayacağından emin değildi. Bu sebeple, SLA üzerine ellerindeki starterin CAD dosyasını yüklemişler ve Şekil 7.1' de ki gibi prototipi oluşturmuşlardır. Jeep motoruna elde edilen starter prototipi monte edildiğinde, yapılan tasarımın doğru olduğu anlaşılmıştır.
- Başka bir örnek ise, SL yöntemi kullanılarak optimum çevresel hava kanalının boyutlarının hesaplanmasıdır. Farklı çaplarda üç model denenmiş ve daha sonra akış testlerine tabi tutulmuş, ve 80 mm olan model en iyi seçenek olmuştur.
- Chrysler' de SL modelleri Reçine transferi ile kalıplama (RTM) yöntemi ile kalıp eldesi amaçlı kullanılmaktadır. Karmaşık bölüm olarak tanımlanan modelin iç kısmı, SL teknolojisi ile çok rahatlıkla oluşturulmaktadır.
- Otomobil manifoldu prototipi Stereolitografi yöntemi uygulanarak elde edilmektedir. Bir manifold kalıbı oluşturulması aşamasında, modelcinin manifoldun iç ve dış yüzeylerini bilmesi gerekmektedir. Bu sebeple öncelikle manifoldun SLA yöntemi ile Şekil 7.2' de gösterildiği gibi prototipi yapılmakta ve daha sonra prototip model olarak kullanılmakta ve kalıbı yapılmaktadır.



Şekil 7.1 SL yöntemi ile imal edilmiş otomobil starteri (Schmidt,1991)



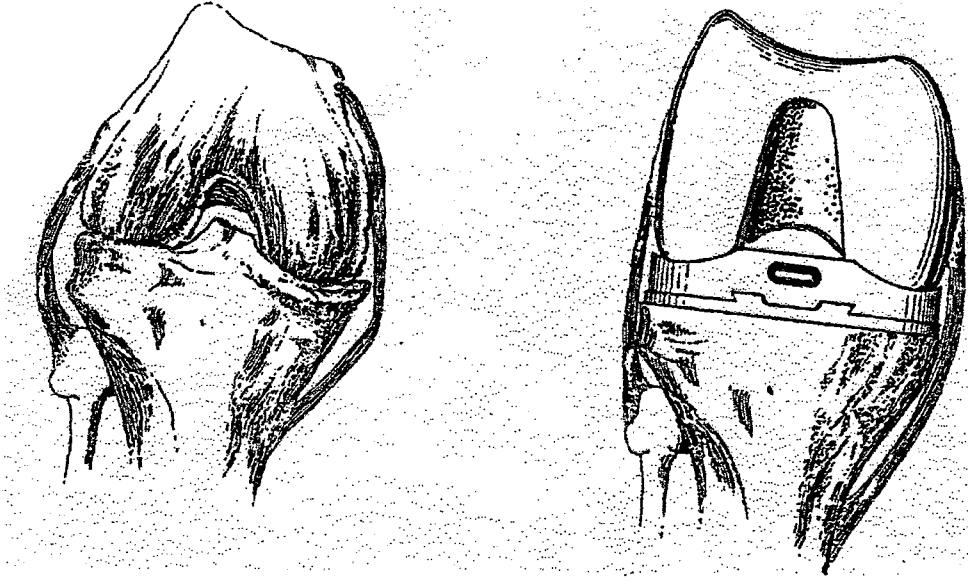
Şekil 7.2 Otomobil manifoldu (Schmidt,1991)

7.3 Biyomedikal Endüstrisindeki Yeri

Medikal endüstrisindeki gelişmeler, hasta tedavisinde kolaylıklar sağlamış ve buna bağlı olarak kalite ön plana çıkmıştır. Virtüel sistemler, lazerli taramalar, robotik sistemler ve hızlı prototipleme, medikal alandaki gelişmeler arasında yer almaktadır.

Jamieson, Holmer ve Ashby'nin de (1995) belirttiği gibi, özellikle ortopedi alanında hızlı prototip uygulaması çok yaygın bir şekilde görülmektedir. Diz kapağı gibi eklem hastalıkları oldukça acı vermekte ve hastaya her zaman uygun protez seçimi yapılamamaktadır. Ancak HP sistemlerinin kullanılmasıyla, çok fazla deneme ve iterasyona gerek duyulmadan doğru eklem protezlerini elde etmek mümkün olmaktadır.

Diz, omuz, bilekler, dirsek gibi birleşme bölgelerindeki protezler, krom kobalt alaşımları, titanyum veya paslanmaz çelik gibi metal bileşenlerden oluşmaktadır. Bu metal protezler, önceden hazırlanmış prototip kemik yapılar ve yüzeylere monte edilmekte ve yapılan iterasyonlarla tedaviler başarıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7.4 Diz kapağı protezi (Chua, ve The,1999)

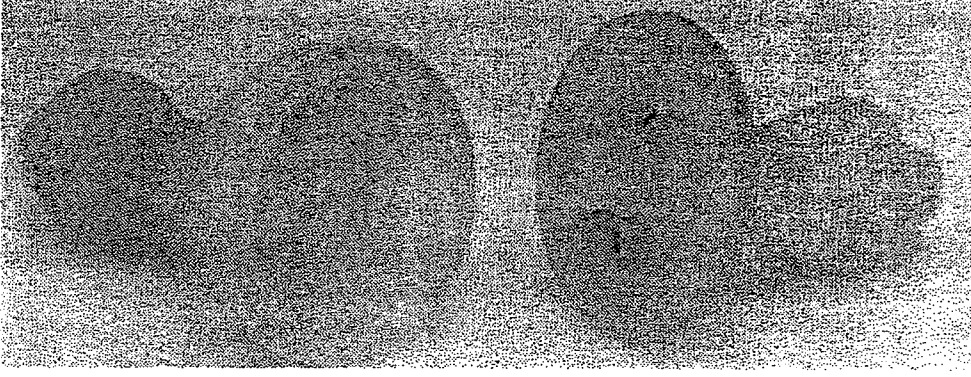
Başka bir örnek ise omuz protezi örneği olmaktadır. Buradaki protez prototiplerin oluşumu aşamasında, ortopedik cerrahlar önemli rol oynamaktadır.

Prototipin boyutunun, dizaynının ve detaylarının incelenmesinden sonra protezler oluşturulmaktadır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5 Omuz prototipi (Jacobs,1997)

Omuz başları önceleri sıvı metal bileşenlerinden oluşmaktaydı. Fakat medikal protezlerde, ağırlık önemli bir faktördür, dolayısıyla hızlı prototip modelleri ile içi boş iki parçalı dökme omuz başı elde edilebilmektedir (Şekil 7.6). Farklı birleşim dizayn ve tolerans ötelemeleri ile SL prototipleri elde edilmektedir.



Şekil 7.6 İki parçalı omuz başları



8. HIZLI PROTOTİPLEME UYGULAMALARI

8.1 Stereolitografi (SL) Uygulaması

Arçelik A.Ş Tuzla tesisleri Hızlı Prototipleme ve İmalat Sistemleri Bölümü'nde , 22.02.2001 sabah saat 10:00' da SLA-250 (Şekil 8.1) makinasında, I-DEAS programıyla katı modeli oluşturulmuş endüstriyel bir tasarımın prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. İşlem iki saat sürmüştür ve saat 12:00' da tamamlanmıştır.

İşlem esnasında kullanılan malzeme ve tüm parametreler aşağıda sırasıyla verilmiştir.



Şekil 8.1 SLA-250 HP makinası

8.1.1 Dosya

Parça dosyası;	yes5.stl	146 KB
Destek yapısı ile birlikte;	yes5_s.stl	160 KB

8.1.2 Bilgisayar Destekli Tasarım

Parça 2972 üçgenle kaplanmıştır.

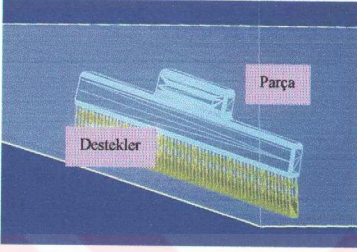
Hacim = 1574.52 mm³

Yüzey alanı = 2087.29 mm²

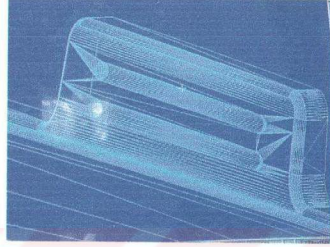
Parça Ölçüleri

Prototipin destekler ile birlikte CAD modelinin STL formatı Şekil 8.2' de, teknik resmi ve katı modeli ise Ek-7' de gösterilmiştir.

\underline{X}	\underline{Y}	\underline{Z} [mm]
3.893	96	13



Şekil 8.2.(a) Modelin desteklerle birlikte STL Formatı



Şekil 8.2.(b) STL detayı

Şekil 8.2 Modelin STL formatı

Parçadaki yanlış üçgen dilimleme veya boşluk hataları gibi tasarım hataları 3D Lightyear yazılımın kendi bünyesinde bulunan doğrulama modülünün (Verify Modülü) kullanılmasıyla düzeltilmiştir.

8.1.3 Z Eksenini Seçimi

Z eksenini parçanın dilimleme eksenini ifade etmektedir. Parçanın maliyetini ve işleme süresini etkileyen önemli bir faktör olmaktadır. Z eksenini seçiminde aşağıda sayılan faktörler önem taşımaktadır.

- Z eksenini seçiminde parça yüksekliği (h) önemli bir etken olmaktadır. Bu değer fazla olduğunda tabaka sayısı ve bu duruma paralel olarak dilimleme sayısı da artmaktadır. Bu artış işleme süresini etkilemektedir çünkü, parçanın bilgisayar ortamında işlenmeye hazırlanması sırasında yapılan dilimleme işlemi ve süre de uzamaktadır.
- Parçada eş çalışacak kısımların belirlenip ona göre destek yapılarının konumları belirlenmeli ve eksen seçimi bu kriterler göz önüne alınarak yapılmalıdır. Aksi takdirde, destek yapılarının oluştuğu kısımlarda düzgünlükler meydana gelmektedir. Bu kısımlar daha sonra temizlenerek istenilen boyuta getirilebilmektedir.

- Dairesel kısımlar, tam olarak elde edilebilmesi için eksenin z eksenine paralel olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Eğrisel kısımların z eksenine dik geldiği kısımlarda dilimleme, dolayısıyla imalat sonrası parçanın bu kısımlarında daha önceden bahsedilmiş olan merdiven adımı etkisi oluşmaktadır.

8.1.4 İmalat Parametreleri

Parça için	Tabaka kalınlığı = 0.15 mm
Destek için	Tabaka kalınlığı = 0.15 mm
Toplam katman sayısı	141 tane
Lazer ışın çapı	0.16 mm seçilmiştir.

8.1.5 Lazer

Kullanılan lazer He-Cd lazeridir. Lazer gücü, SLA-250 seri makinasında 25mW (maksimum 40mW). Bu değerın artması ile lazer tarama hızını da artmaktadır. 4000 saatlik kullanım ömrü vardır.

8.1.6 Veri Transferi

Tasarımın yapıldığı bilgisayardan, imal edilecek olan parça aktif (online) olarak SLA-250 makinasının güç ünitesine aktarılmaktadır. Bu aşamada, bilgisayar ortamında işleme prosesinin simülasyonu izlenebilmektedir.

8.1.7 Destekler

Kullanılan destek çeşitleri daha önceki bölümlerde izah edilmiştir. Uygulama parçasının tasarımı tamamlandıktan sonra kullanılan yazılımın (3D Lightyear) içinde bulunan destek modülü aracılığı ile destekler otomatik olarak oluşturulmaktadır.

8.1.8 Malzeme

Kullanılan malzeme, 3D Systems Firması'nın Cibatool SL 5170 adlı epoksi fotopolimeridir. Bir kilogramı 280- 300 dolar (\$) değerindedir.

İmal edilecek parçanın ağırlığı 1.8 gramdır.

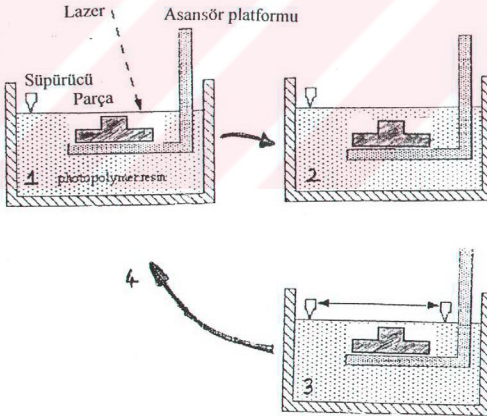
8.1.9 İşleme

İşleme başlamadan yarım saat önce lazer açılıp ısıtılmaya bırakılmıştır. SLA- 7000 serisinde ise bu işleme gerek yoktur.

Parçanın z ekseninin seçimi yapılmıştır Süpürme alanının dar bir alan olması için ve süpürme esnasında parçanın devirilmemesi için parçanın z eksenini Şekil 8.2'deki gibi seçilmiştir. Bilgisayardaki tasarım ile ilgili tüm işlemler (z eksenini seçmek, tasarım hatalarını gidermek, destekleyicileri seçmek gibi) 15 dakika sürmüştür.

Prototipi imal edilecek parçadan saydamlık bekleniyorsa SLA-250 serisi kullanmak daha avantajlı olmaktadır. Fonksiyonellik ve esneklik ön planda ise SLA-7000 serisi kullanılmalıdır. Bu seçim farkı, makinaların uyumlu olduğu epoksi malzemelerden kaynaklanmaktadır.

Lazerle reçineyi katılaştırma işlemi başladığında, öncelikle destekler oluşturulmaktadır. Bu işlem esnasında süpürme işlemine gerek duyulmamaktadır. Süpürme parça katılaştırılmasına geçildiğinde başlamaktadır. Şekil 8.3' de işlemin şematik görünümü gösterilmektedir.



Şekil 8.3 SLA- 250 makinasında parça imalatının gerçekleştirilmesi

- (1) Lazerle polimer, katmanlar halinde katılaştırılmaktadır.
- (2) Asansör katılaştırmış polimer sıvı ile kaplanacak şekilde aşağıya indirilmektedir.
- (3) Süpürücü sıvı polimer tabakasını düzeltilmektedir.
- (4) İşlem yeniden başlar tamamlanıncaya kadar devam etmektedir.

Aşağıda ifade edilen süreler her katman için geçerlidir.

Derin dalma = 2 saniye

Yükseltme = 3 saniye

Z bekleme = 5 saniye

Lazerle tarama = 2 saniye

Süpürme = 15 saniye

Toplam 27 saniye., 141 katman olduğuna göre; $141 \times 27 = 3807 \text{ sn} \approx 1 \text{ saat}$

Parça tamamlandıktan sonra reçineden süzölmeye bırakılması = 5 dakika

Parçanın temizlenmesi = 10 dakika

Sonuç itibarıyla tüm zamanların toplamı (işlem öncesi ve sonrası) 2 saat almıştır.

8.2 Silikon Kalıplama

İmal edilecek olan parça, çamaşır makinası düğmesidir. Öncelikle SLA yöntemi ile parça SLA-250 makinasında imal edilmekte ve yüzeyini pürüzsüz hale getirmek için zımparalanmaktadır (Şekil 8.4). Prototipin CAD tasarımı Ek-8' de verilmiştir.

Master model olarak kullanılacak olan prototip üzerinde bölme yüzeyi tayin edilmekte ve parçadaki açık olan geometrik deliğin, döküm aşamasından sonra kalıbın ayrılmasını engellemesi için ince bir bant yardımıyla anılan geometrik boşluk kapatılmaktadır.

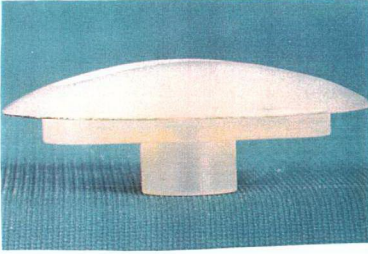
Modele monte edilecek olan döküm yolluğunun yeri tayin edilmektedir. Kalıbın havalandırma kanallarını oluşturacak havalandırma çubukları ve yolluk, modele 404 bazlı bir yapıştırıcı yardımıyla elle yapıştırılmaktadır. Şekil 8.4' de model üzerindeki yolluk yeri ve yapışma noktaları gösterilmiştir. Şekil 8.5' de ise kalıp havuzu içinde model ile birlikte yolluk ve havalandırma çubukları görülmektedir.

Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra, kalıp havuzuna dökülecek olan silikon miktarı hesaplanmaktadır. Bu hesaplama işlemi için öncelikle kalıp havuzunun boyutları ölçülmektedir.

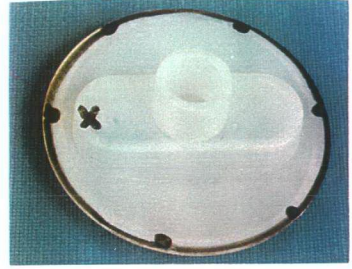
Ölçüm sonuçları: $1 \times 0.8 \times 0.6 \text{ (dm)}$

Silikon yoğunluğu 1.1 gr/dm^3

Silikon miktarı = $1 \times 0.8 \times 0.6 \times 1.1 = 528 \text{ gr}$



Şekil 8.4 (a) Prototipin önden görünüşü



Şekil 8.4 (b) Prototipin alttan görünüşü

X →Yolluk yeri

● →Havalandırma çubuklarının yeri



→ Bölme yüzeyi

Şekil 8.4 SL yöntemi ile imal edilmiş çamaşır makinası düğmesi prototipi

Malzeme

Dow Corning- Slastic T - 4 silikonu; iki bileşenlidir. Silikonların özellikleri Ekte sunulmuştur. Ağırlık açısından, 1 kg silikona 100 gr sertleştirici kullanılmaktadır.

Döküm için kullanılan poliüretan malzemelerin özellikleri Çizelge 8.1' de verilmiştir.



Şekil 8.5 Parçanın yolluk ve havalandırma çubukları ile birlikte havuz içindeki görünümü

İşlem aşamaları

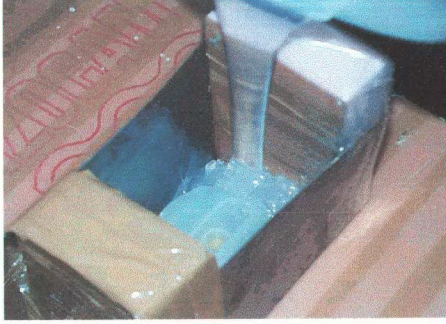
- Şekil 8.5' deki gibi model, kalıp havuzu içine alınır,
- Elde edilen silikon ve sertleştirici (katalizör) karışımı mikserle karıştırılır,
- Vakuma altında karıştırılan malzemelerin havası alınır (8 dakika),

- Havası alınan karışım, kalıp havuzuna dökülür (Şekil 8.6),
- Silikon ile parça arasında hava kalmaması için kalıp havuzu, vakum makinası içine alınır,
- Havası alınan kalıp 60 °C'lik fırında 6-8 saat bekletilir,
- Fırından alınan kalıp elle, manuel olarak bir neşter yardımıyla ayrılır, kalıbın dişi ve erkek yarısını elde edilir (Şekil 8.8),
- Kalıbın döküme hazır hale gelmesi için 40 °C'lik fırında 15 dakika kadar ısıtılır. Kalıp büyükse bu süre artabilir.
- Model (prototip) ağırlığının 1.5 katı kadar poliüretan dökülür. Poliüretan karışım da iki bileşenden oluşmaktadır. A ve B komponentlerinden oluşan poliüretan karışımları ile ilgili bilgiler ve özellikler Çizelge 8.1' de verilmiştir. Uygulamada dökülen parça 16 gramdır, ancak vakum makinası 100 gramdan daha az dökememektedir, bu sebeple ağırlıklarına göre 50A/50B oranında poliüretan karışımı hazırlanır. Karışımın vakum altında havası alınır (45 dakika).
- Parçanın kalıba yapışmaması için, kalıp ısıtıldıktan sonra, kalıbın her iki yarısına kalıp ayırıcı; silicone spray tatbik edilir.
- Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra, kalıbın her iki yarısı, tel zimba birbirine kenetlenir.
- Kalıp ve dökülecek olan poliüretan karışım vakum makinasına alınır. Karışımı barındıran haznenin (karışım kovasının) sahip olduğu hortum, kalıp yolluğuna yerleştirilir (Şekil 8.9). Karışımın havasını almak için vakum odasında otomatik olarak karıştırılır (8 dakika) ve yine otomatik olarak kalıp içine dökülür.
- Kalıp 60°C' lik fırın içine alınır, 25 dakika bekletildikten sonra kalıp sökülür ve döküm parça elde edilir (Şekil 8.10).
- Parça kalıp içinden alınıp, yolluk ve havalandırma çubukları parçadan ayrılır, ayrımın gerçekleştiği noktalardaki pürüzleri gidermek için ayrım noktaları zımparalanır.

Elde ettiğimiz parçaya hiçbir bitirme işleminin uygulanmasına gerek yoktur, amaca ve kullanılacak yere göre ister deneme amaçlı, ister direkt endüstriyel parça (çamaşır makinası düğmesi) olarak kullanılabilir.

Kullanılan makina

MCP Vacuum Casting Machine; maksimum dökülebileceği kalıp boyutları;



Şekil 8.6 Kalıp havuzuna silikon dökülürken



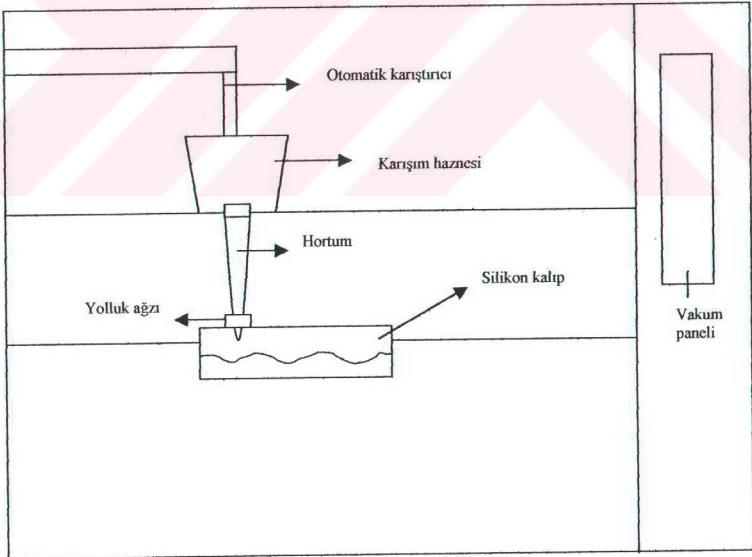
Şekil 8.7 Silikon kalıp



Şekil 8.8 Silikon kalıbın ayrılmasından sonraki resmi

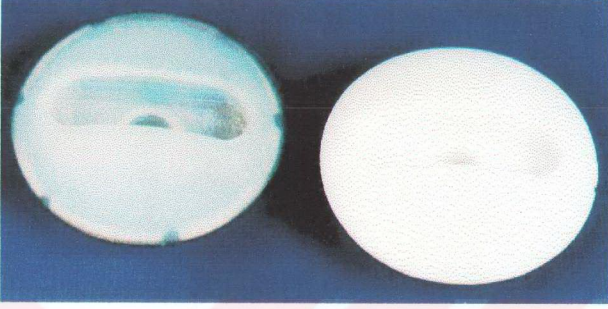
Çizelge 8.1 Silikon dökümde kullanılan poliüretan karışımların özellikleri

ÜRÜN	PX 215 A PX 215 B	Px 223 HTA PX 223 HTB	PX 514 A PX 514 B	PX 761 A PX 761 B	PX 774 A PX 774 B
Özellikler					
Karışım oranı: ağırlık	100/100	100/80	100/75	45/100	44/100
Kompozisyon	Isocyanate/ Polyol	Isocyanate/ Polyol	Isocyanate/ Polyol	Isocyanate/ Polyol	Isocyanate/ Polyol
Görünüş	Açık - +sarı/Renklessiz	Renksiz/Siyah	Şeffaf/Şeffaf	Renksiz/sarı	Sarı/Siyah
Karışım rengi	Beyaz	Siyah	Şeffaf	Sarı	Siyah
Vizkosite(25°C) mPa.s	A: 60±10 B: 125±25 K: 90±10	A: 900±20 B: 300±50 K: 800±50	A: 800-1600 B: 500-700 K: 500-800	A: 150-250 B: 3500- 4500 K: 1200- 1800	A: 25-45 B: 800-1200 K: 600-800
Çarpma dayanımı (kJ/m ²)	30	>60	55	-	-
Kopma dayanımı (kJ/m ²)	1500	2300	1500	-	-
Çekme (mm/m)	2	-	2	-	-
Maks.dökümkalınlığı (mm)	-	-	10	-	-
Kalıp bozma süresi (dk.)	-	45	60	45	60-90
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.22	1.14	-	1.1	1.02
Kesme dayanımı (kN/m)	-	-	-	20	20
Çalışma sıcaklığı (°C)	-	-	-	-40↔+80	-40↔+80
Sertleşme süresi (dk.-saat)	60-65°C'de 45 dk.	100°C'de 60 dk.	70°C'de 120-180 dk.	360 dk.	240 dk.



Şekil 8.9 Vakum makinasının şematik görünümü

Bu çalışma esnasında kullanılan poliüretan Çizelge 8.1' deki ilk gruptur (PX 215A - PX 215B). Bu grubun kırılgenliği ve kendini çekme değeri azdır. Fakat her yapılan dökümde, kum kalıba dökümde olduğu gibi kendini çekme payı bırakılmaktadır



Şekil 8.10 Döküm parça ve prototipi

8.3. FDM Uygulaması

Uygulama Infotron Firması'nda gerçekleştirilmiştir. Firma, 1994 yılından beri faaliyet göstermektedir. Prototipleme sistemi olarak Stratasys 'in FDM serisi ni kullanılmaktadır.

Uygulamada, direksiyon ara kolunun 1/2 ölçekle imal edilmesi amaçlanmaktadır. Kullanılan makina FDM 2000 serisidir. Cihazın özellikleri Çizelge 8.3' de verilmiştir. Yöntemde kullanılan malzeme ABS esastır. Parçanın tabaka kalınlığı 0.254 mm olmaktadır. Makina iç sıcaklığı 75 ° C olmaktadır. Parçanın imal edilmesi yaklaşık olarak beş saat sürmüştür.

Sistemin çalışma esası SL yöntemine benzerdir. İlk önce imal edilecek olan parçanın CAD ortamında tasarımı yapılmaktadır. Prototipin CAD tasarımı Ek-9' da verilmiştir. Elde edilen CAD verisi STL formatına çevrilmektedir (Şekil 8.12). SL yönteminde olduğu gibi STL dosya kesitleri hesaplanmaktadır. Bu işlem için Stratasys Firması' nın geliştirdiği Quick Slice adlı yazılım kullanılmaktadır. Çevrim tamamlandıktan sonra parça ile ilgili veri tasarımın yapıldığı bilgisayardan FDM makinasının güç ünitesine aktarılmaktadır. Parçanın FDM cihazı tarafından tanımlanması ile uygulama işlemi başlamaktadır.

FDM yönteminde ABS, elastomer, hassas döküm mumundan olmak üzere üç değişik malzemeden, istenen renkte, ofis ortamında, fonksiyonel test yapılmaya uygun ve ek bir işlem gerektirmeyen yüksek hassasiyet prototipler kolay ve hızlı bir şekilde imal edilmektedir.

Çizelge 8.2' de Stratasys Firması' nın kullandığı malzemelerin mukavemet özellikleri verilmiştir. Çizelge 8.3' te de FDM 2000' in özellikleri verilmiştir.

ABS (P400): , Parçalar üzerinde fonksiyonel testleri uygulamak açısından uygundur.

ABSi (P500): Çarpma dayanımı 176 J/m olup, HP endüstrisinde en çok tercih edilen olmaktadır.

Hassas döküm reçinesi (ICW06):

Elastomer (E20): Çok esnek bir malzemedir. Otomotivden giyim endüstrisine (ayakkabı gibi), elektronik endüstrisine bir çok alanda kullanılmaktadır.

Polyster (P1500): Bu malzeme ucuz ve çabuk elde edilmesi gereken modeller için çok uygundur. Destekleyicilerde aynı malzemeden oluşturulup ayrılmaları oldukça kolaydır.

Çizelge 8.2 Stratasys malzemeleri (Stratasys Materials, 1997)

MALZEME	Çekme mukavemeti (Mpa)	Çekme modülü (Mpa)	Eğme direnci (Mpa)	Eğme modülü (Mpa)	Çarpma dayanımı (J/m)	Sertlik (D)	Uzama oranı (%)
P400	34.45	2.480	65	2.618	107	78	>10%
P500	37.21	1.963	59	1.771	176	76	>10%
ICW06	3.51	275	4	276	17	13	>10%
E20	6.41	69	5	138	347	96(A)	>10%
P1500	19.29	827	28	827	32	62	<10%

İşlem, makaraya sarılı ekstrüzyon kafalarının platform düzleminde tanımlanmış bir Z noktasına taşınmasıyla başlamaktadır. Daha önceden de belirtildiği gibi iki tane ekstrüzyon kafası bulunmaktadır. Birincisi model malzemesini beslemekte, diğeri ise destek malzemesini beslemektedir (Şekil 8.12)

Çizelge 8.3 FDM 2000 System Özellikleri

Parça boyutları	254 x 254 x 254 mm
Hassasiyet	±.127 mm (±.005 in)
Boyut ve ağırlık	660(w) x 1067(h) x 914(d) mm 160 kg
Güç	220 VAC, 50 / 60 Hz veya 110 VAC, 12A, 60 Hz
Model malzemeleri	ABS Hassas döküm reçinesi Elastomer
Lazer genişliği / Kalınlık	0.254 to 2.54 mm genişlik kalınlık 0.5 - .762 mm
Operatör	Gerekmez

Öncelikle destek malzemesini besleyen ekstrüzyon memesi çalışmakta ve platform üzerinde belirli bir tabaka kalınlığına kadar destek oluşturmaktadır. Daha sonra ikinci ekstrüzyon memesi faaliyete başlamakta ve tabaka tabaka parça oluşturulmaktadır.

İşlem, makaraya sarılı model malzemesinin ekstrüzyon kafalarına itilerek yarı sıvı faza dönüşüncüye kadar ısıtılması ve ekstrüzyon kafasından da, çok ince tabakalar halinde çıkması esasına dayanmaktadır. Quick Slice yazılımı aracılığı ile her çıkan malzeme ile tabaka oluşturulmakta ve oluşan tabaka hemen donmaktadır. Parça, tüm işlem çevriminin tamamlanmasıyla oluşturulmaktadır (Şekil 8.14).

İşlem parametreleri

Model malzemesi: ABS P400 Model Material

Destek malzemesi: ABS P400 Release

Kullanılan model malzeme miktarı: 29.8 gram, 11.4 metre, 28.41 cm³

Kullanılan destek malzemesi miktarı: 5.4 gram, 2.1 metre, 5.12 cm³

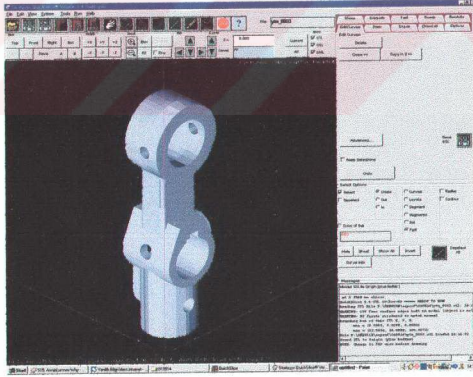
Parçanın tanımlandığı üçgen sayısı: 4912 üçgen, 2442 nokta

Parçanın oluşturulma süresi: 4 saat 25 dakika (4.4 saat)

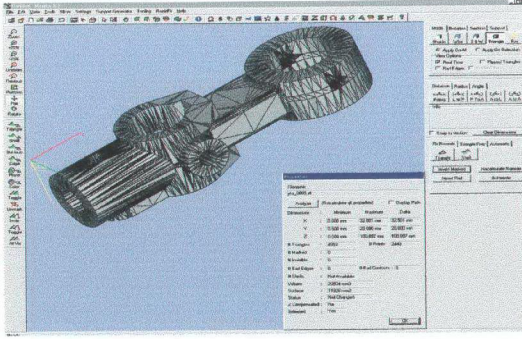
Çalışma esnası makina iç sıcaklığı: 70 °C

Ekstrüzyon kafasındaki uç sıcaklıkları : Model kafası uc sıcaklığı: 270°C, destek malzemesi kafası uç sıcaklığı: 265 °C,

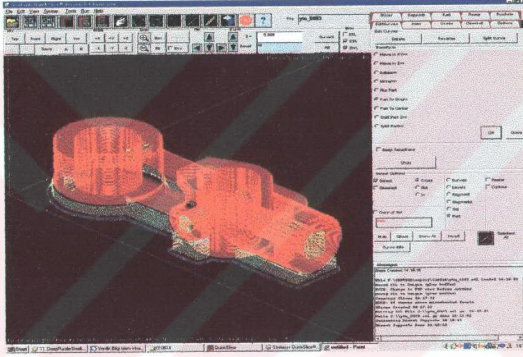
Makinanın ısı kaynağı ya da ısı mekanizması: Makina içerisindeki fanlar iç sıcaklığı arttırmakta, termokupllar ise ortam sıcaklığını sürekli dengede tutmaya çalışmaktadır.



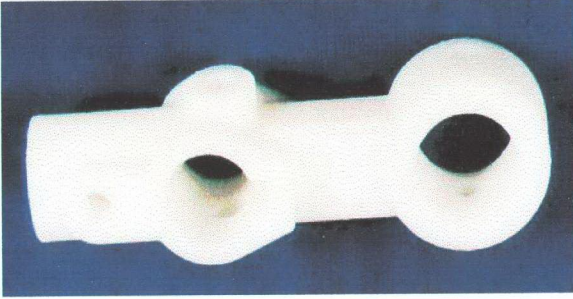
Şekil 8.11 Parçanın CAD tasarımı



Şekil 8.12 Parçanın STL formatı



Şekil 8.13 Parça ve destekleyicileri



Şekil 8.14 İmal edilen FDM parçası

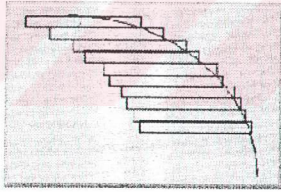
9. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, Hızlı Prototipleme Teknolojileri genel anlamda tanıtılmış, en çok uygulanan beş HP yönteminin; Stereolitografi (SL), Ergiyik Malzeme Yığıma Yöntemi (FDM), Tabakalı Cisim İmalatı (LOM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Katı Tabaka Kurutma Yöntemi (SGC) özellikleri, işlem aşamaları ve parametreleri incelenmiştir. HP sistemlerinin bir parçası olan CAD yazılımları ve HP sistemlerine entegrasyonu izah edilmiştir.

Son olarak, endüstriyel uygulamalarla desteklenmek suretiyle iki SL ve bir FDM prototip imalatı gerçekleştirilmiş ve SL prototiplerinden biri yöntemin parametrelerini incelemek, diğeri ise silikon kalıpta master model olarak kullanmak üzere imal edilmiştir.

9.1 Literatür Araştırmasının Sonuçları

- Tüm HP sistemlerinde imal edilen prototipler üzerinde yapılan görsel muayenelerde, merdiven adımı etkisi görülmektedir (Şekil 9.1). Bu tür bir etki dilimleme eksenine göre bazı eğrisel kısımların oluşmasına neden olmaktadır. Önlem olarak, z eksenini seçimine daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi dikkat edilmelidir, aksi takdirde bu etki, parça üzerinde yüzey pürüzlülüğüne sebep olmaktadır.



Şekil 9.1 Merdiven adımı etkisi

- SL, FDM, LOM, SLS, SGC sistemleri incelendiğinde, hepsinin bir CAD sistemine ihtiyaç gösterdiği görülmektedir. CAD tasarımı yapılan parça modeli, HP makinası tarafından tanımlanması için STL formatı gibi özel dönüştürücülerle cihazın güç ünitesine aktarılmakta ve bu aşamada model dilimlenmektedir. Katı parça bu dilimlerin katman katman birbirine eklenmesiyle oluşmaktadır.

SL, FDM, LOM, SLS, SGC sistemleri arası farklılıklar Çizelge 9.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 9.1 Bazı HPİ teknolojilerinin karşılaştırılması

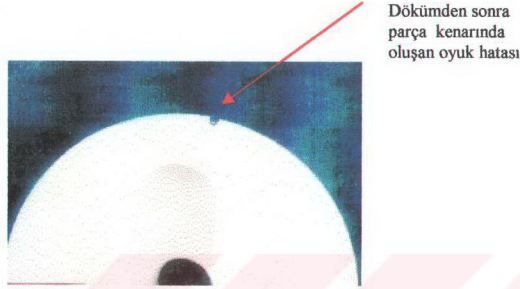
İşlem	SLA 250	FDM 1650	SLS 2000	LOM 1015	SOLİDER 5600
Firma	3D Systems	Stratasys	DTM	Helisys	Cubital Ltd.
Maks.parça Büyüklüğü [mm]	250 x 250 x 250	250 x 250 x 250	305 x 380 x yükseklik	340 x 250 x 380	500 x 500 x 350
Tabaka kalınlığı (min. – maks.) [mm]	0.19 – 0.9	0.050 – 0.750 0.250 – 2.500 (yol genişliği)	0.13	0.005 – 0.050	0.05 – 0.15
Hız (düşey)	Parça büyüklüğüne bağlı	Parça büyüklüğüne bağlı	Parça büyüklüğüne bağlı	10 mm/saat	60 – 100 tabaka / saat
Doğruluk- Hassasiyet	0.2	± 0.125	± 0.05 - ± 0.25	± 0.125	% 0.1
Malzemeler	Fotopolimer reçine	ABS, Hassas döküm mumu,bazı elastomerler	Termoplastik malzemeler (PVC, naylon, ABS mum)	Kağıt, naylon, polyster	Fotopolimer reçine, mum
Destek ihtiyacı	Var	Var	Yok	Var	Var
Kurutma işlemi	Gerekir	Gerekmez	Gerekmez	Gerekmez	Gerekmez
Bitirme işlemleri	Gerekir	Gerekmez	Gerekmez	Gerekir	Gerekir
FTM ye uyumluluk	Uyumlu	Uyumlu	Uyumlu	-	Uyumlu

- Çizelge 9.1 de yer almayan bazı cihazların daha üstün özelliklere sahip olduğu önceki bölümlerde izah edilmiştir. Örneğin 3D Systems kataloglarına göre, SLA –500 serisinde 500 x 500 x 610 (mm) ve SLA-7000 serisinde ise 600 x 600 x 630 (mm) büyüklüklerde parçalar 0.01 hassasiyetle imal edilmektedir. LOM 2030 serisinde de 760 x 500 x 500 (mm) büyüklüklerde parçalar imal edilebilmektedir.

9.2 Uygulama Sonuçları

- SL ve FDM yöntemleri arasındaki en büyük fark, parça işleme esnasından kaynaklanmaktadır. SL’ de lazerle katılaştırılan reçine ile parçalar katman katman oluşturulmaktadır. FDM’ de ise ısı etkisi ile ergiyen plastikler, lifler halinde nozüllerden çıkmakta ve yine ısı etkisiyle lifler katman katman yapışarak parçayı oluşturmaktadır.
- SL ve FDM yöntemleri ile imal edilen parçalar, koordinat ölçme cihazında (CMM) ölçülmüştür. Sonuç olarak parçaların tolerans sınırları içinde olduğu görülmüştür. Parçalarda yapılan görsel muayenelerde, merdiven adımı etkisi görülmüştür
- SL ve FDM yöntemleri ile elde edilen prototipler arası fark ise prototiplerin fonksiyonelliklerinden kaynaklanmaktadır. FDM prototipler, SL prototiplere nazaran çok daha esnek ve yapılabilecek fonksiyonel testlere daha uyumludur. Ancak yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksektir.

- Silikon kalıplama işleminin sonunda yapılan incelemelerde, döküm parçasının çevresinde bir oyuk (girinti) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9.2). Bunun sebebi ise döküm tekniği esasına dayanmaktadır. Havalandırma kanalları yeterli olmadığı için poliüretan malzeme hava kabarcığı yapmış ve kalıbı tam dolduramamıştır. Bu durumu engellemek için daha çok havalandırma kanalı oluşturulmalıdır.



Dökümden sonra parça kenarında oluşan oyuk hatası

Şekil 9.2 Döküm parçası üzerinde tespit edilen hata

9.3 Maliyetler

- Hızlı Prototipleme Teknolojilerinde, ilk yatırım, işletme ve bakım olmak üzere farklı maliyetler ön plana çıkmaktadır. İşlemlerde kullanılan cihaz, fotopolimer, lazer ve silikon malzemeler oldukça pahalı olması nedeniyle, HP sistemlerin ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Kullanılan cihazların fiyat tablosu Çizelge 9.2' de verilmiştir.
- Stereolitografi ve silikon kalıplama çalışmalarının yapıldığı Arçelik tesislerinde HP yöntemleri ile imal edilen parçaların satış fiyatı 2-5 / gram değeri arasında değişmektedir. Bu değer, Arçelik Firması ile parçanın satıldığı firma arasındaki bağlantıya göre değişmektedir. Parçanın silikon kalıbı yapıldığında bu değer biraz daha artabilmektedir.
- Servis bürosu olarak faaliyet gösteren Infotron firmasında ise daha önce de belirtildiği gibi HP yöntemlerinden Ergiyik Malzeme Yığılma yöntemi uygulanmaktadır. Infotron' da sipariş üzerine gelen parça satış fiyatı ise saat üzerinden (40 / saat) değerlendirilmektedir

Çizelge 9.2 Bazı HPI teknolojilerinin maliyet yönünden karşılaştırılması (Kai ve Fai, 1992)

İşlem	Firma	Makina Maliyeti (1993 US\$)	Malzeme Maliyeti (\$/cm ³)
SLA - 250	3D Systems	220,000	0,080
SLA - 500	3D Systems	450,000	0,080
3D Modeller	Stratasys	172,000	0,072
SLS 2000	DTM Corp.	289,000	0,079
LOM 1015	Helisys	95,000	0,006
LOM 2030	Helisys	180,000	0,006
SOLIDER 5600	Cubital	550,000	0,026

- Çizelge 9.2' de görüldüğü gibi, SLA-500 ve SLS 2000 sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri diğerlerine göre yüksektir. SL – 250 ise daha düşük ilk yatırım maliyetine sahiptir. LOM sistemleri düşük yatırım ve malzeme maliyetleri ile en ucuz HP teknolojisi olarak görülmektedir. Ancak imal edilen prototiplerin kağıt esaslı olması bazı kısıtlamalar getirmektedir.

Tüm sistemlerde, yazılım ve servis anlaşmaları dahilinde ek maliyetlerin gözükmesi söz konusudur.

9.4 ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada SLA, FDM, SLS, ve LOM gibi HP yöntemlerinden en çok kullanılan sistemler tanıtılmıştır, ancak HP teknolojilerinin sınıflandırılması bölümünde isimleri geçen diğer yöntemleri de prototip imalatında kullanmak mümkündür.

Sonuç olarak, eğer imal edilecek prototipten esneklik veya fonksiyonellik bekleniyorsa FDM yönteminin, görünüm açısından şeffaflık bekleniyorsa SLA yönteminin seçilmesi, geometrik olarak büyük ama mukavemet dayanımı ihmal edilebilen ve mali açıdan da ucuz bir prototip imalatında LOM yönteminin veya kalıp imal edilecekse SLS yönteminin seçilmesi doğru bir tercih olmaktadır. HP yöntemleri ile doğrudan kalıp imalatında SLS yöntemi seçilmektedir çünkü, SLS yöntemi geometrik olarak karmaşık kalıp detaylarının imal edilebilmesine imkan veren bir sistem olmaktadır. Özellikle son yıllarda SLS yönteminde sadece toz halindeki plastik malzemeler değil, toz metal malzemelerde de kullanılmaya başlanmış ve kısa sürede metal kalıplar imal edilebilmektedir.

Kalıplarda master model olarak kullanım amaçlı prototiplerin imalatında ise HP yöntemlerinden herhangi biri seçilebilmektedir. Prototipin imalat yönteminin farklılığı, kalıplama parametrelerini etkilememektedir.

KAYNAKLAR

Kai, C.C., Fai, L.K., (1997), Rapid Prototyping Principles and Applications in Manufacturing, Singapore.

Jacobs, P.F., (1992), Rapid Prototyping Society of Manufacturing Engineers, California.

C.K.Chua, K.Hong and S.L. Ho, (1999) "Rapid Tooling Technology, Part 1 A.Comparative Study" Journal of Advanced Manufacturing Technology, 605-608

C.K.Chua, K.Hong and S.L. Ho, (1999) " Rapid Tooling Technology, Part 2 A.Comparative Study" Journal of Advanced Manufacturing Technology, 609-614

Tyberg, J., Helge, J., (1999), "FDM Systems and Local adaptive Slicing", Virginia Technical Source: Materials and Design, Vol:20, no:2.

Kochan, A. Parangon, (1994)"Uses LOM Technology to Cut Product Development Times", Assembly Automation, Vol.14, No.2, 32-34.

Kimble, L.,(1991) "Selective Laser Sintering Process, Applications of a New Technology", Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Atlanta, 73-80.

Famieson, R., Hacker, H., (1995) "Direct Slicing of CAD Models for Rapid Prototyping, Rapid Prototyping Journal, 4-12

Fai L.K., C.C., Kai, (1996), "A study of Stereolithography File Errors and Repair Part1- Generic Solutions", International Journal of Advanced Manufavturing Technologies, 407-414

Ashley,S., (1994), "Prototyping with Advanced Tools", Journal of Mechanical Engineers, 48-55.

Dvorak, P., (1993), "Rapid Prototypes for Production Parts", Machine Design,48-51.

Jamieson, R., Holmer, B., and Ashby A., (1995), " How Rapid Prototyping can Assist in the Development of New Orthopadeic products", 38-41.

Schmidt, L.D., (1991) "Applications of sStereolithography in Automotive Industry", Successful Applications of Rapid Prototyping Technologies Conference Society of Manufacturing Engineers, 23-29.

Kai, C.C, Howe, C.T., (1998), "Integrating Rapid Prototyping and Tooling with Vacuum Casting for Connectors", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V:14, No:9, 617-623.

Wohlers, T., (1995), "Future Potential of Rapid Prototyping and Manufacturing Around the World", Rapid Prototyping Journal Vol:1, No:1, 4-10.

3D Systems,(1993-Spring) "The Edge" dergisi, Darmstadt

Cibatool Tanitim Katalogları, (1998), USA

The Stratasys Materials Katalogları (1999), Minneapolis-USA

DTM Ltd. Firması İnternet Sayfası, www.dtm.com

Stratasys Ltd. Firması İnternet Sayfası, www.stratasys.com

Wacker RTV-2 Silikon Kauçuk Katalogları (1998), Neokim Endüstri ve Sağlık Ürünleri,
İstanbul



Ek - 1 Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 3500

Silikon Kauçuk:	ELASTOSİL M 3500		
Katalizör:	T35		
Katılaştırma Oranı:	%4 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	150	Bu orana göre donma süresi (sa) 24
	%5 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	80	Bu orana göre donma süresi (sa) 20
En uygun uygulama alanı:	Polyster ve alçıya uygundur		
Uygulama şekli:	Sıvamaya ve püskürtmeye uygundur		
Donma şartları:	Oda sıcaklığında donar		
Teknik Özellikler	Donma öncesi: Renk: Süt rengi, şeffaf Yoğunluk: 1.11 gr/cm3, 23°C Vizkosite: Pastakivamında, akıcıdeğil Performans: =< 10 mmfilm kalınlığına kadar akma yapmadan yüzeyde durabilir		
	Donma sonrası: Yoğunluk: 1.11 gr /cm3, 23°C Sertlik: 20 Shore A Gerilme mukavemeti 4 N/mm2 Uzama 700 % Lineer büzülme 0.6 % Yırtılma mukavemet >30 N/mm2		

Ek - 2 Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M4400

Silikon Kauçuk:	ELASTOSİL M4400		
Katalizör:	T40 veya T37		
Katılaştırma Oranı:	%2 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	40	Bu orana göre donma süresi (sa) 5-7
	%3 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	90	Bu orana göre donma süresi (sa) 9 -12
En uygun uygulama alanı:	Polyster kalıplar için uygundur		
Uygulama şekli:	Döküm tekniği ile		
Donma şartları:	Oda sıcaklığında donar		
Teknik Özellikler	Donma öncesi: Renk: Soluk sarı Yoğunluk: 1.31 gr /cm ³ , 23°C Vizkosite: 30.000 mPa s, 23°C		
	Donma sonrası: Yoğunluk: 1.30 gr /cm ³ , 23°C Sertlik: 23 Shore A Gerilme mukavemeti 2 N/mm ² Uzama 250 % Lineer büzülme 0.7 % Yırtılma mukavemet >3 N/mm ²		

Ek - 3 Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M4500

Silikon Kauçuk:	ELASTOSİL M 4500		
Katalizör:	T12		
Katlaştırma Oranı:	%3 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	60	Bu orana göre donma süresi (sa) 6-8
	%4 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)	30	Bu orana göre donma süresi (sa) 4-5
En uygun uygulama alanı:	Polyster kalıplar için uygundur		
Uygulama şekli:	Döküm tekniği ile		
Donma şartları:	Oda sıcaklığında donar		
Teknik Özellikler	Donma öncesi: Renk: Beyaz Yoğunluk: 1.21 gr/cm ³ , 23°C Vizkosite: 25.000 mPa s, 23°C		
	Donma sonrası: Yoğunluk: 1.20 gr/cm ³ , 23°C Sertlik: 12 Shore A Gerilme mukavemeti 3.0 N/mm ² Uzama 500 % Lineer büzülme 0.6 % Yırtılma mukavemet >=15 N/mm ²		

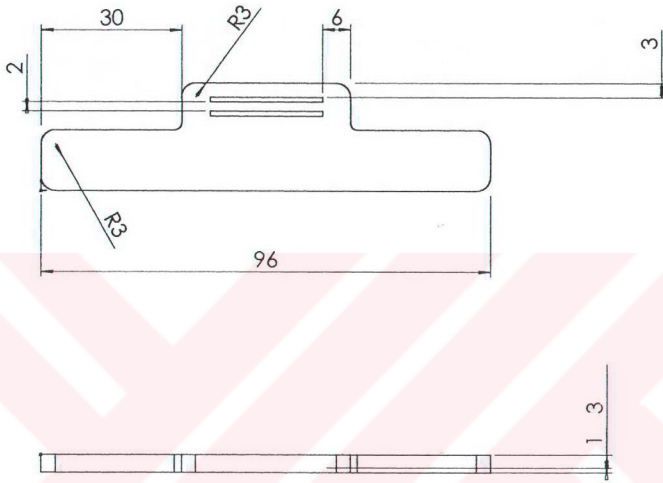
Ek - 4 Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M 4512

Silikon Kauçuk:	ELASTOSİL M 4512
Katalizör:	T51
Katılaştırma Oranı:	%5 – Bu orana göre kullanım süresi (dak.)
En uygun uygulama alanı:	Polyster ve poliüretan kalıpları için uygundur
Uygulama şekli:	Döküm tekniği ile
Donma şartları:	Oda sıcaklığında donar
Teknik Özellikler	<p>Donma öncesi: Renk: Beyaz Yoğunluk: 1.2 gr /cm³, 23°C Vizkosite: 35.000 mPa s, 23°C</p> <p>Donma sonrası: Yoğunluk: 1.19 gr /cm³, 23°C Sertlik: 18 Shore A Gerilme mukavemeti 3.5 N/mm² Uzama 650 % Lineer büzülme 0.4 % Yırtılma mukavemet 21 N/mm²</p>

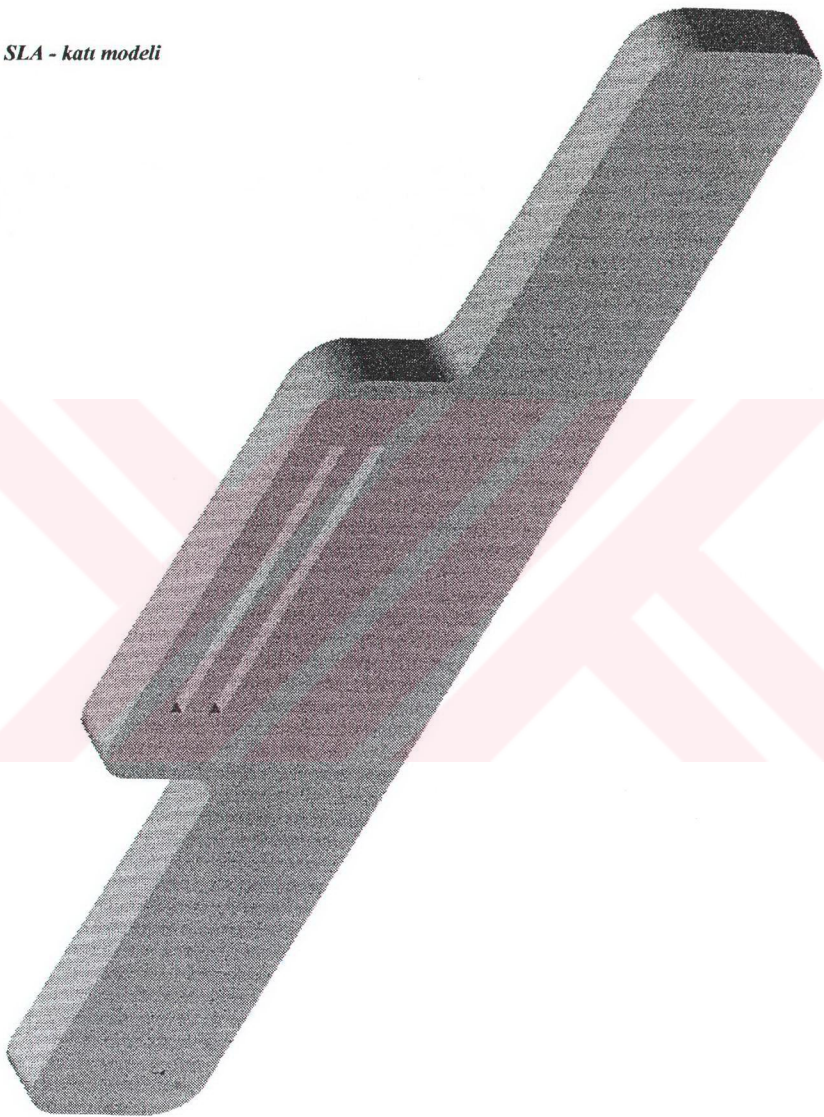
Ek - 5 Wacker RTV-2 Silikon Kauçukları- ELASTOSİL M4601

Ek donma işlemi uygulananlar

Silikon Kauçuk:	ELASTOSİL M 4601																							
Komponent karıştırma oranı (w/w):	A: 9	B: 1																						
En uygun uygulama alanı:	Başta Poliüretan olmak üzere Poliester, epoksi döküm reçineler için																							
Uygulama şekli:	Döküm tekniği ile																							
Teknik Özellikler	Donma öncesi: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td>Renk: Beyaz</td> <td>Bordo</td> </tr> <tr> <td>Yoğunluk: 1.14</td> <td>1.01 gr /cm³, 23°C</td> </tr> <tr> <td>Vizkosite: 25.000 mPa s, 23°C</td> <td>800</td> </tr> </table> Donma sonrası: (23 °C, 24 saat sonra) <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>Renk</td> <td>Bordo</td> </tr> <tr> <td>Yoğunluk:</td> <td>1.13 gr /cm³, 23°C</td> </tr> <tr> <td>Sertlik:</td> <td>28 Shore A</td> </tr> <tr> <td>Gerilme mukavemeti</td> <td>7.0 N/mm²</td> </tr> <tr> <td>Uzama</td> <td>600 %</td> </tr> <tr> <td>Lineer büzülme</td> <td>0.1 %</td> </tr> <tr> <td>Yırtılma mukavemet</td> <td>>=11 N/mm²</td> </tr> </table>		A	B	Renk: Beyaz	Bordo	Yoğunluk: 1.14	1.01 gr /cm ³ , 23°C	Vizkosite: 25.000 mPa s, 23°C	800	Renk	Bordo	Yoğunluk:	1.13 gr /cm ³ , 23°C	Sertlik:	28 Shore A	Gerilme mukavemeti	7.0 N/mm ²	Uzama	600 %	Lineer büzülme	0.1 %	Yırtılma mukavemet	>=11 N/mm ²
A	B																							
Renk: Beyaz	Bordo																							
Yoğunluk: 1.14	1.01 gr /cm ³ , 23°C																							
Vizkosite: 25.000 mPa s, 23°C	800																							
Renk	Bordo																							
Yoğunluk:	1.13 gr /cm ³ , 23°C																							
Sertlik:	28 Shore A																							
Gerilme mukavemeti	7.0 N/mm ²																							
Uzama	600 %																							
Lineer büzülme	0.1 %																							
Yırtılma mukavemet	>=11 N/mm ²																							
Uygulama Süreleri:	Sıcaklık, °C	Süre																						
Döküm süresi	-15	>2 dak.																						
	5	5 sa.																						
	15	3 sa.																						
	23	90 dak.																						
	30	40 dak.																						
Donma süresi	23	12sa.																						
	35	3sa.																						
	70	20 dak.																						
	100	10dak.																						
	150	5dak.																						

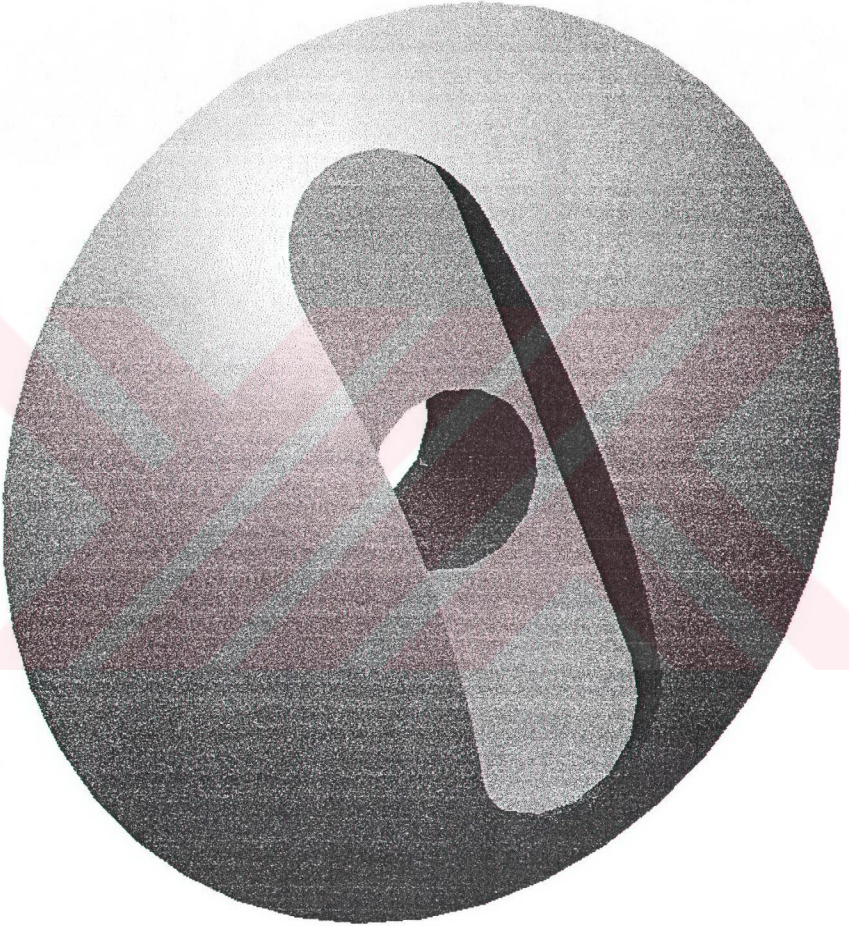
Ek-7 SLA prototipinin CAD tasarımı*SLA - teknik resmi*

SLA - katt modeli

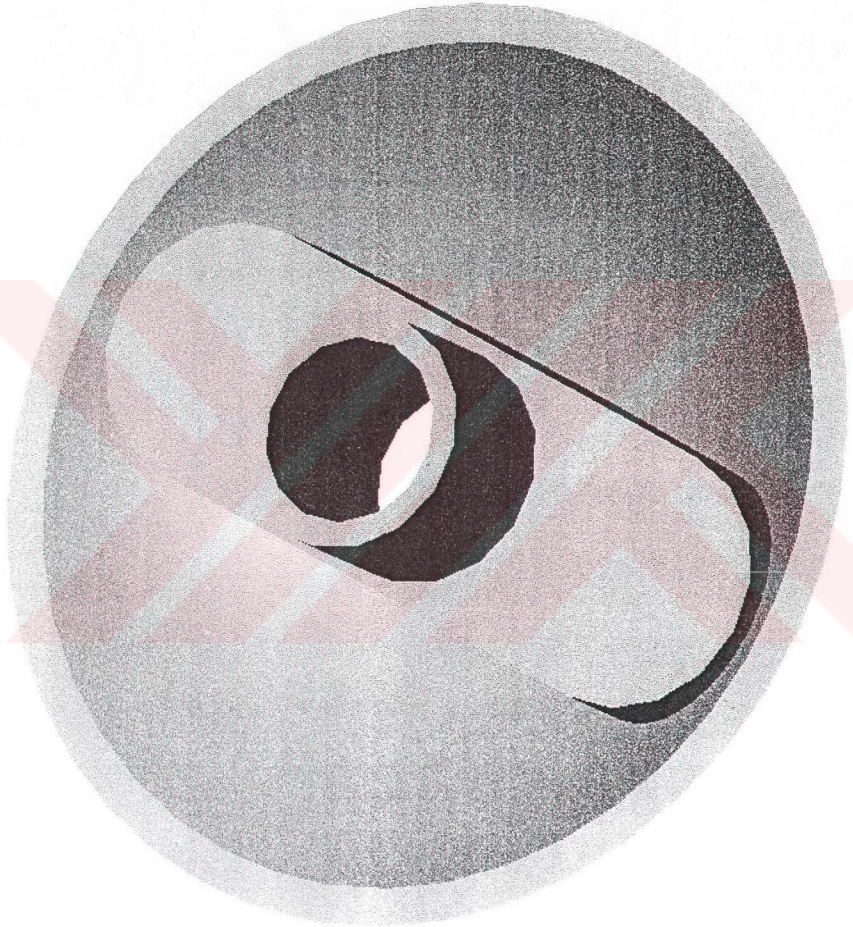


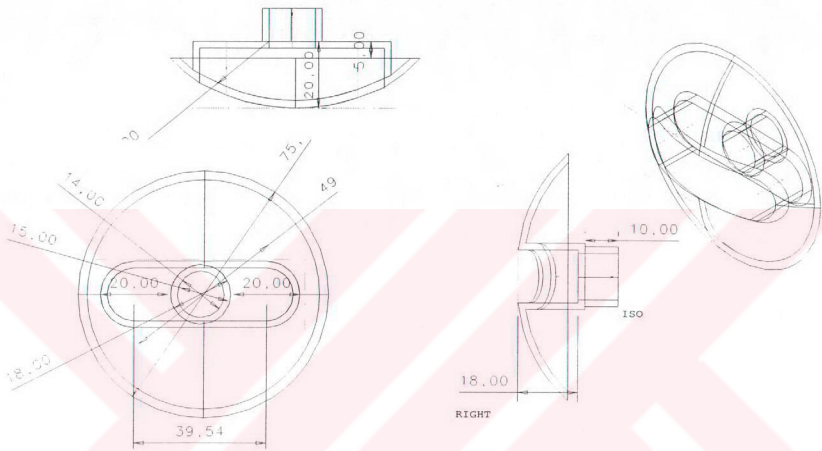
Ek- 8 Master model olarak kullanılan prototipinin CAD tasarımı

Master model SLA – katı modeli (önden)



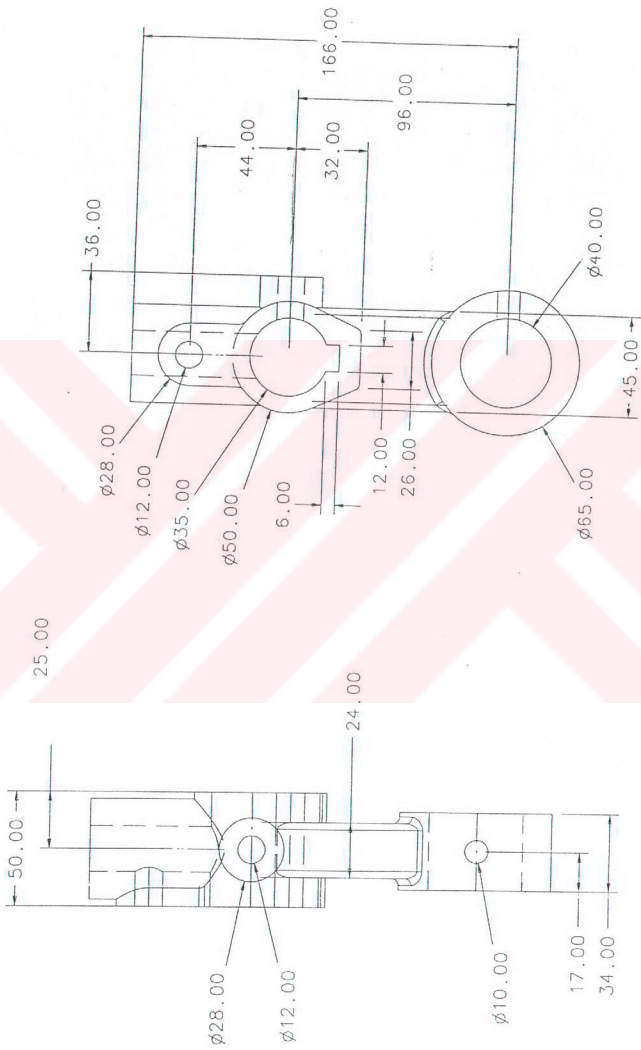
Mastar model SLA – katı modeli (arkadan)



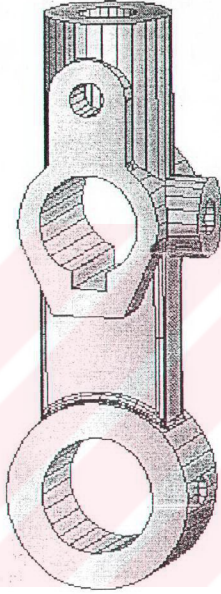
Mastar model SLA – teknik resmi

Ek-9 FDM prototipinin CAD tasarımı

FDM – teknik resmi



FDM katı modeli



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 12.10.1977

Doğum yeri İstanbul

Lise 1992-1995 Özel Doğuş Lisesi

Lisans 1995-1999 Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1999-2001 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Anabilim Dalı,
İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum(lar) 1999- Devam ediyor YTÜ Makine Fakültesi
Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi
Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi