

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STEREOLİTOGRAFI YÖNTEMİYLE İMAL EDİLEN
PROTOTİPLERDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ARTIK
GERİLMELERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mak. Müh. Nahit BÜYÜKŞAHİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usülleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erhan ALTAN

İSTANBUL, 2007

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STEREOLİTOGRAFI YÖNTEMİYLE İMAL EDİLEN
PROTOTİPLERDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ARTIK
GERİLMELERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mak. Müh. Nahit BÜYÜKŞAHİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmal Usülleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erhan ALTAN

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mesut ÖZGÜRLER

Doç. Dr. Ferhat DİKMEN

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	ii
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1.GİRİŞ	1
1.1. Hızlı Prototiplemenin Tarihçesi.....	2
1.2. Hızlı Prototiplemenin Esasları.....	6
1.3. Artık Gerilme.....	8
1.4. Literatür Araştırması.....	9
2. HIZLI PROTOTİPLEME	17
2.1. Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Sınıflandırılması	17
2.1.1. Stereolitografi (SLA)	20
2.1.1.1. SLA Sistemlerinde Kullanılan Fotopolimer Malzemeler	31
2.1.2. Katı Tabaka Kurutma (SGC).....	36
2.1.3. Seçici Lazer Sinterleme (SLS).....	37
2.1.4. FDM (Ergimiş Malzeme Yığma).....	38
2.1.5. LOM (Tabakalı Nesne Üretimi)	40
2.1.6. Ink-Jet Printing	41
2.1.7. Kesip Yapıştırma Yöntemi	44
2.2. Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Faydaları.....	45
2.3. Hızlı Prototipleme Teknolojilerinin Uygulamaları.....	46
2.3.1. Hızlı Prototipleme	49
2.3.2. Hızlı Kalıplama.....	49
2.3.3. Hızlı İmalat	51
2.4. Ülkemizde Uygulamaları	53
3. ARTIK GERİLMELER.....	54
3.1. Artık Gerilmelerin Sınıflandırılması.....	54
3.1.1. Birinci Çeşit- Makroskobik Gerilmeler (σ^I)	54
3.1.2. İkinci Çeşit - Mikroskobik Gerilmeler (σ^{II})	55
3.1.3. Üçüncü Çeşit – Mikroskobik Gerilmeler (σ^{III}).....	55
3.2. Artık Gerilmelerin Temel Kaynakları.....	56
3.2.2. Termal Kaynaklı Artık Gerilmeler.....	58
3.2.3. Metalürjik Kaynaklı Artık Gerilmeler.....	59
3.3. Artık Gerilme Ölçüm Yöntemleri.....	60
3.3.1. Delik Delme Yöntemi	61
3.3.2. Katman Kaldırma Yöntemi	63
3.3.3. X-Ray Kırınım Yöntemi.....	65
3.3.4. Nötron Kırınım Metodu.....	67

3.3.5. Manyetik Yöntem	68
3.3.6. Ultrasonik Yöntem	69
3.3.7. Raman Spektroskopisi Yöntemi	70
3.3.8. Uyma Yöntemi.....	71
3.4. Artık Gerilme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması	71
3.5. Katman Kaldırma Metodunun Ayrıntılı Olarak İncelenmesi.....	72
3.6. Artık Gerilmelerin Etkileri	76
3.7. Artık Gerilmelerin Kontrol Edilmesi	76
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR	78
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	90
KAYNAKLAR	92
EKLER	95
Ek 1 P1 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri.....	95
Ek 2 P2 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri.....	97
Ek 3 P3 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri.....	99
Ek 4 P4 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri.....	101
Ek 5 Tüm Numunelerdeki Artık Gerilme Sonuçlarının Çizelgesi	103
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGE LİSTESİ

σ^I	Birinci Çeşit Artık Gerilme
σ^{II}	İkinci Çeşit Artık Gerilme
σ^{III}	Üçüncü Çeşit Artık Gerilme
P	Yük (MPa)
ε	Uzama
λ	X-Ray ışınının dalga boyu
θ	X-Ray ışınının geliş açısı
ψ	Dönme açısı
E	Elastisite modülü (MPa)
ν	Poisson oranı
t_{ijk}	Etki vektörü
V	Dalga hızındaki değişim(m/s)
V_0	Gerilmesiz bir atomdaki dalganın hızı (m/s)
J	Akustoelastik sabit
C	Eğrilik (1/m)
δ	Kaldırılan katman kalınlığı (mm)
ξ	Kaldırılan katman üzerindeki uzaklık (mm)
σ^{rs}	Artık gerilme (MPa)

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CAM	Bilgisayar destekli üretim
GARPA	Hızlı Prototipleme Kurumlarının Global Birliği
CNC	Bilgisayarlı nümerik kontrol
STL	Stereolitografi
SLA	Stereolitografi cihazı
SGC	Katı tabaka kurutma
SLS	Seçici lazer sinterleme
CO ₂	Karbondiyoksit
FDM	Ergimiş malzeme yığma
LOM	Tabakalı nesne üretimi
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MJM	Multi jet modelleme
CMM	Koordinat ölçme cihazı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Bir ürünün üretilmesi sürecinde temel unsurlar: Yüksek kalite, Düşük maliyet ve Zaman	1
Şekil 1.2. Artık gerilmelerin etkisi olan çelik konstrüksiyon	8
Şekil 1.3. Dolgusuz ABS numunelerdeki artık gerilmeler	10
Şekil 1.4. Dolgulu ABS numunelerdeki artık gerilme dağılımı.....	10
Şekil 1.5. Nylon numunelerdeki artık gerilme dağılımı	11
Şekil 1.6. Dolgusuz ABS numunelerde artık gerilme dağılımı (delik delme yöntemi)	11
Şekil 1.7. Nylon numunelerde artık gerilme dağılımı (delik delme yöntemi).....	12
Şekil 1.8. Dolgusuz ABS numunelerde artık gerilmelerin delik delme ve katman kaldırma yöntemleriyle elde edilen sonuçları.....	13
Şekil 1.9. Nylon numunelerde artık gerilmelerin delik delme ve katman kaldırma yöntemleriyle elde edilen sonuçları.....	13
Şekil 2.1. Dört temel üretim prosesi: (a) eksiltici prosesler (b) şekil verilen prosesler (c) ilave yapılan prosesler (d) hibrid prosesler	17
Şekil 2.2. Üretim proseslerinin sınıflandırılması	18
Şekil 2.3. Stereolitografi yönteminin şematik gösterimi	20
Şekil 2.4. Üretilen parça numunesinin STL verisine dönüştürülmüş hali	21
Şekil 2.5. Çeşitli lazer güç seviyeleri için katman kalınlığı ve üretim süresi grafiği.....	22
Şekil 2.6. Çeşitli tarama boşlukları için katman kalınlığı ve üretim süresi grafiği.....	23
Şekil 2.7. Çeşitli parça boyutları için katman kalınlığı ve üretim süresi grafiği.....	23
Şekil 2.8 Çeşitli parçalar için r_{kr}	25
Şekil 2.9. Zephyr Recoater sistemi.....	28
Şekil 2.10. Zephyr Recoater sisteminin çalışma prensibi.....	29
Şekil 2.11. İnce destek yapıları	29
Şekil 2.12. 3D Systems tarafından geliştirilen QuickCast sistemi.....	30
Şekil 2.13. Mikro stereolitografi yöntemiyle üretilmiş bir parça.....	31
Şekil 2.14. Kızılötesi dalgaboyundaki lazer ışığı normalde çıplak gözle görülememesine rağmen fotopolimer reçine yüzeyine çarpınca görünür mavi bir ışıma ortaya çıkar.	32
Şekil 2.16. Zincir başlangıcı	34
Şekil 2.18. Katı Tabaka Kurutma prosesi.	36
Şekil 2.19. SLS prosesinin şematik yapısı.....	37
Şekil 2.20. Bir parçanın CAD modeli ve SLS yöntemiyle üretilmiş prototip.	38
Şekil 2.21. FDM yöntemiyle hassas döküm mumu kullanılarak üretilmiş ince cidarlı bir şişe. Böyle bir şişenin talaşlı imalatla tek parça halinde imal edilmesi imkânsızdır	38
Şekil 2.22. FDM yönteminin şematik olarak prensibi.....	39
Şekil 2.23. FDM teknolojisiyle üretilen seramik parçalar.....	39
Şekil 2.24. LOM sisteminin şematik gösterimi.....	40
Şekil 2.25. LOM yönteminin işlem yapısı.	40
Şekil 2.26. LOM yöntemiyle üretilmiş bir dişli kutusu.....	41
Şekil 2.27. MIT ‘nin geliştirdiği 3 boyutlu baskı tekniği	41
Şekil 2.28. MJM’ nin yapısı.....	42
Şekil 2.29. 3D Printer’ ın çalışma yöntemi.....	43
Şekil 2.30. 3D Plotting sisteminin çalışma prensibi.....	43
Şekil 2.31. CAM-LEM prosesi	44
Şekil 2.32. CAM-LEM yöntemiyle üretilmiş bir parça	44
Şekil 2.33. Offset-Fabbing prosesinin şematik gösterimi.....	45
Şekil 2.34. Offset – Fabbing yöntemiyle üretilen bir parça	45
Şekil 2.35. Snecma firmasının analiz için ürettiği türbin rotoru ve kanatları.....	47

Şekil 2.36. Bir kafatasının modeli ve üretilen protez.....	47
Şekil 2.37. 3D Printing ile üretilmiş bir yüzük tasarımı.....	48
Şekil 2.38. 3 boyutlu oluşturulan harita.....	48
Şekil 2.39. Üretilen bir yılan modeli ve 3D Printer ile üretilmiş prototip.....	48
Şekil 2.40. LOM yöntemiyle elde edilen model ve üretilen plastik enjeksiyon parçası.....	50
Şekil 2.41. Hassas dökümle üretilen bir jet motoru parçası (solda) ve bu parçanın kullanılan SLA modeli.....	50
Şekil 2.42. SLS yöntemiyle üretilen bir havalandırma parçası.....	52
Şekil 2.43. 3D Printing ile üretilmiş olan gözenekli seramik filtre.....	52
Şekil 2.44. Mictotec firmasının ürettiği elektrik motoru ve tüm mekanizması.....	53
Şekil 3.1. Artık gerilmelerin uzunluk derecelerine göre sınıflandırılması.....	54
Şekil 3.2. Makro – Mikro gerilmelerin değişik tipleri.....	55
Şekil 3.3. Mekanik yüklemelerin sebep olduğu artık gerilmeler.....	56
Şekil 3.4. 3 farklı taşlama işlemi sonucunda sertleştirilmiş bir çelikte oluşan gerilme dağılımı.....	58
Şekil 3.5. Dönüşüm plastisitesi.....	59
Şekil 3.6. Tipik bir delik delme cihazı.....	61
Şekil 3.7. Strain Gaugelerin yerleşimi.....	62
Şekil 3.8. Kullanımda olan strain-gaugeler.....	62
Şekil 3.9. Kontur yönteminin şematik gösterimi.....	64
Şekil 3.10. X-Ray Cihazı.....	65
Şekil 3.11. ψ değerindeki değişim ile kırınımın dönmesi.....	67
Şekil 3.12. Akustoelastik ölçüm yapılandırmalarının şematik gösterimi.....	70
Şekil 3.13. Katman kaldırma sonucu oluşan içbükey ya da dışbükey eğriler.....	73
Şekil 3.14. Katman kaldırma ile numunede oluşan eğrilik.....	73
Şekil 3.15. Katman kaldırma.....	75
Şekil 4.1. Numunelerin üretiminde kullanılan üçgen destek yapısının görünümü.....	78
Şekil 4.2. Numunelerin üretiminde kullanılan kare destek yapısının görünümü.....	79
Şekil 4.3. Numunenin tezgaha bağlanma şekli.....	79
Şekil 4.4. Profil projektör cihazının görüntüsü.....	80
Şekil 4.5. Numunelerin plakaya bağlanmış görüntüsü.....	80
Şekil 4.6. (a) Ölçüm için tezgah tablasına yerleşim (b) Ekrandaki ölçüm için oluşan görüntü.....	81
Şekil 4.7. P1 Numunesine Ait Sehim Grafiği.....	81
Şekil 4.8. P1 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği.....	82
Şekil 4.9. P1 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları.....	82
Şekil 4.10. P2 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği.....	83
Şekil 4.11. P2 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları.....	84
Şekil 4.12. P2 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları.....	84
Şekil 4.13. P3 Numunesine Ait Sehim Grafiği.....	85
Şekil 4.14. P3 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği.....	86
Şekil 4.15. P3 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları.....	86
Şekil 4.16. P4 Numunesine Ait Sehim Grafiği.....	87
Şekil 4.17. P4 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği.....	88
Şekil 4.18. P4 Numunesine Ait Artık Gerilme Grafiği.....	88
Şekil 4.19. Tüm numunelerdeki artık gerilme sonuçlarının karşılaştırılması.....	89

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Tarihsel gelişim	3
Çizelge 1.3. Modelleme ve prototipleme arasındaki paralellikler	6
Çizelge 1.4. Artık gerilme kaynaklarının şematik gösterilmesi.....	9
Çizelge 1.5. Epoksi bazlı reçinelerdeki bulunan artık gerilme değerleri.....	15
Çizelge 1.6. Hesaplanan artık gerilme değerleri	16
Çizelge 2.1. Hızlı prototipleme teknolojilerinin işlem teknolojisine göre sınıflandırılması	19
Çizelge 2.2. Hızlı prototipleme sistemlerinin kullanılan malzemeye göre sınıflandırılması ...	19
Çizelge 2.3. 3D Systems SLA cihazlarının farklı parametreler yönünden incelenmesi	31
Çizelge 2.4. Viniteler bazlı fotopolimer reçinelerin fiziksel özellikleri	35
Çizelge 2.5. 3D Systems firmasının ürettiği epoksi bazlı fotopolimerler	35
Çizelge 2.6. DSM Somos firmasının ürettiği epoksi bazlı fotopolimerler	36
Çizelge 3.1. Ölçüm yöntemlerinin bir karşılaştırması.....	60
Çizelge 3.2. Temel ölçüm yöntemlerinin malzeme özellikleri açısından karşılaştırılması	61
Çizelge 3.3. Artık gerilme ölçüm yöntemlerinde fiziksel karakteristiklerin karşılaştırılması..	71
Çizelge 3.4. Artık gerilme ölçüm yöntemlerinin avantajları – dezavantajları.....	72
Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan numunelerin parametreleri	78

ÖNSÖZ

Stereolitografi yöntemi hızlı prototipleme sistemlerinin ilk geliştirilen yöntemidir. Stereolitografi terimi; 3 boyutlu anlamına gelen “stereo” ve baskı anlamına gelen “litografi” kelimelerinin birleşmesinden meydana gelen 3 boyutlu baskı anlamında kullanılmaktadır. Ticari olarak ilk kez 1986 yılında geliştirilen bu sistemler sayesinde hızlı prototipleme sistemleri günümüze kadar hızla gelişmeye başlamış ve endüstriyel alanda büyük bir kullanım alanına sahip bir sektör halini almıştır.

Malzemeleri olumlu veya olumsuz etkileyen artık gerilmelerin araştırılması ise sürekli olarak devam etmekte ve bu yöntemler incelenecek parçaya, büyüklüğüne ve maliyete göre değişmektedir. Katman kaldırma yöntemi de tahribatlı artık gerilme ölçülmesi yöntemlerinden olup bu çalışmada stereolitografi yöntemiyle farklı proses parametrelerine sahip numunelerdeki artık gerilmelerin incelemesinde kullanılmıştır.

Bu çalışmanın hazırlanmasında ilk günden itibaren desteklerini esirgemeyen ve bilgi birikimini paylaşan tez danışmanın Prof. Dr. Sn. Erhan ALTAN’ a, deneysel çalışmaların yapılmasında gerekli ekipmanı kullanmama izin veren ARPEK A.Ş. yönetimine, deney çalışmaları sırasında deneyimlerini paylaşan Sn. Doğan GÜNEŞ’ e, doğduğum günden bu güne dek maddi manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babam başta olmak üzere, ablalarıma, ağabeyime ve Elif’ime teşekkür ederim.

Nahit Büyüksahin

ÖZET

Geçmiş yıllarda, üretim teknolojilerinin çıkış noktası olan tasarım sürecinde özellikle yeni bir ürünün devreye alınması sırasında büyük sorunlar ile karşılaşılmaktaydı. Özellikle tasarım bittikten sonra, bu tasarımın ilk çıktılarını somut olarak ele almak ve mevcut hataları görerek gerekli düzeltmeleri yapmak neredeyse imkânsız veya çok yüksek maliyetlere sahip bir aşamaydı. Fakat son yıllarda ortaya çıkan “Hızlı Prototipleme Teknolojileri”; gerek ürünün devreye alınma sürecini azaltması, gerekse bu süreçteki hataları en aza indirmesi sayesinde üretim teknolojilerinde maliyet düşürücü bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Diğer bir yandan malzemelerde meydana gelen ve fiziksel-mekanik özellikleri etkileyen “artık gerilmeler” mühendisliğin temel konularından biri halini almıştır. Çünkü günümüz ekonomik koşullarında bir ürünün pazarda tutunabilmesi için yüksek kalite, düşük maliyet ve uzun ömür kriterleri karşımıza çıkmaktadır.

DeneySEL çalışmalar yardımıyla, “Hızlı Prototipleme Teknolojilerinin” en sık kullanılan yöntemi olan stereolitografi yöntemiyle imal edilen prototiplerde; imalat esnasında kullanılan bazı proses parametreleriyle artık gerilmeler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Deney numuneleri epoksi bazlı reçineden 0,1 mm ve 0,15 mm katman kalınlıklarında üretilmiştir. Ayrıca bu numunelerin destek yapıları üçgen ve kare olarak değiştirilerek farklı prototipler elde edilmiştir.

Deneyler sonucunda bulunan sonuçlarda prototip imalatı sırasında katman kalınlığının artması basma gerilmelerini düşürdüğü fakat gerilmenin çekme yönüne dönmesiyle gerilmelerin katman kalınlığı ve destek yapılarıyla beraber olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Üçgen destek yapı kullanıldığında katman kalınlığının artması çekme gerilmelerini arttırmakta, buna rağmen kare destek yapı kullanıldığında katman kalınlığının artması çekme gerilmelerini azaltmaktadır.

Basma gerilmesine maruz kalan yapılarda dayanımın yüksek olması isteniyorsa üçgen destek yapıları kullanılmalıdır. Buna karşın çekme gerilmesine maruz kalan yapılarda ise yüksek dayanım elde etmek için kare destek yapıları kullanılmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Hızlı Prototipleme, Stereolitografi, Artık Gerilme, Katman Kaldırma Metodu

ABSTRACT

In the past, during the design process which is the rising point of production technologies, considerable problems are faced, particularly when the new product is being released. Especially after the design is finished, discussing concretely the first outputs of this design and by observing the existent mistakes, making the necessary corrections become nearly impossible or this come out as a stage which cost very high amounts.

As a result of experiencing high-level cost and loss of time during the product's releasing process, competition chance among firms is removed. By means of "Rapid Prototyping Technologies" that has been raised in recent years, time of product releasing is decreased and minimized the mistakes in this process so greeted us as a cost-reducing component of production technologies. Nowadays, these technologies are widely used by various firms for commercial purposes.

In addition to these, "residual stress" that have been occurred in the materials and effect physical-mechanic characteristics, are one of the basic subject of engineering. Even if, residual stresses generally appear as a parameter which affects mechanic characteristics negatively, in certain occasions, it turns into a particularly desirable condition.

With the help of experimental studies, the relationship between some process parameters that are used at the moment of manufacturing and residual stresses formation is researched in the most well-known method of "Rapid Prototype Technologies"- Stereolithography made prototype parts. Test specimens were produced from epoxy-based resins with 0.1 mm and 0.15 mm layer thickness. Also with changing the support structures of these specimens as a triangle and square; different prototypes were obtained.

In the results of experiments, increased layer thickness, which used during the manufacturing of prototypes, decreases the compressive residual stresses. When the stress values change to the tensile, it is related to both layer thickness and support structures.

When using a triangle support structure, if the layer thickness is increased, tensile residual stresses are also increased. However, when the support structure is a square; tensile residual stresses are decreased with increased layer thickness.

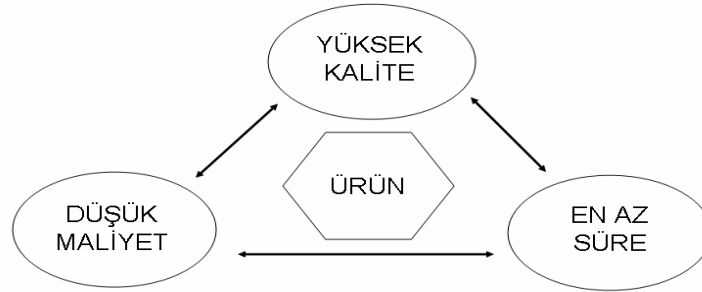
If the high strength is desired in the constructions which are composed to compressive stress, the triangle support structures should be used. If the construction is composed to tensile stress, the square support structure should be used.

Keywords: Rapid Prototyping, Sterelithography, Residual Stress, Layer Removal Method

1.GİRİŞ

Günümüz şartlarında artan rekabet ve yükselen maliyetler; pazarda tutunma çabası gösteren firmalar için en önemli ölçütler haline gelmiştir. Bu ölçütlerin gün geçtikçe üreticileri zorlar hale gelmesi ile üretilecek olan parçanın yüksek kalite ve düşük maliyete sahip olma zorunluluğunun yanı sıra, bu sürecin de çok kısa olması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla yüksek kalite ile düşük maliyete sahip ve kısa sürede üretilecek bir parçanın da tasarımı aşamasının da en kısa sürede ve doğru şekilde yapmak gerekecektir.

Son yıllarda ortaya çıkan hızlı prototipleme sistemleri, her geçen gün daha cazip bir hal almıştır. Hızlı prototipleme teknolojileri sayesinde tasarımı yapılmış olan ürünün fiziksel bir örneği çok kısa bir zamanda tasarımcının elinde olmakta; ayrıca olası eksik ve/veya yanlış kısımların da düzeltilebilmesi için daha doğru kararlar verilebilmektedir. [1]



Şekil 1.1 Bir ürünün üretilmesi sürecinde temel unsurlar: Yüksek kalite, Düşük maliyet ve Zaman

Hızlı prototipleme; kısaca CAD verilerinden otomatik olarak fiziksel model üretme yöntemidir. Bu teknoloji sayesinde çok uzun sürebilecek bir çalışma; mevcut gelişmeler ile kısa vadede çok kısa sürede üretilebilecek duruma gelecektir.

Hızlı prototipleme teknolojileri özellikle son 10 yılda büyük aşama kaydetmiş ve bu teknolojiye sahip firma sayısı geniş bir alana yayılmıştır. Sürekli gelişen bir teknoloji olarak, kaydedilecek ilerlemeler sayesinde, cihaz fiyatlarının düşeceği ve kullanıcı firmaların sayısının artacağı beklenen bir sonuç olacaktır. Bunun yanı sıra teknolojideki gelişim cihaz teknolojilerine de yansıtacak ve hızları artan cihazlar sayesinde hızlı prototipleme sistemleri üretim zamanlarındaki düşüş ile daha ekonomik ve cazip hale gelecektir.

Diğer bir gelişme ise üretilen parçanın kalitesinde olacaktır. Şu anda günümüzde yaklaşık 0.08 mm yüzey kalitesi elde edilmekte olup; gelişen lazer teknolojisi ve motor kontrol sistemleri sayesinde yüzey kaliteleri de artacaktır. Bu; hızlı prototip parçalarının son ürün olarak kullanılmalarına da olanak sağlayacak bir kriterdir. [2]

Özellikle InkJet Printing yöntemleriyle prototiplemenin günümüz koşullarında dahi çok cazip olması; bu teknolojinin yakında küçük çaplı firmalarda da araştırma olanağı yaratacaktır. Medikal alanda günümüzde yapılmakta olan protez çalışmaları daha fazla ilerleme kaydedecektir.

Hızlı prototiplemede kısa vadede beklenen bir diğer gelişme ise, bu yöntem kullanılarak kompozit malzemelerin üretilmesidir. Şu anda çok az sayıda firmanın gerçekleştirdiği bu yöntem ile farklı malzemelerin bir araya gelmesiyle bir mekanizma üretimi gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca çoğunlukla kullanılan hızlı prototipleme malzemeleri polimer bazlı olduklarından; son kullanım için çok fazla uygun değildirler. Metal ve polimer malzemelerin birlikte üretebildikleri hızlı prototipleme sistemlerinin gelişmesi sayesinde, daha dayanıklı “kompozit” parçalar bu teknolojiyle üretililebileceklerdir. [2]

Tüm bu sayılan gelişmeler, aslında günümüzde üzerinde çalışmalar yapılan veya son aşamaya gelinmiş olan teknolojik gelişmelerdir. Her gelişen teknoloji ile bugün itibariyle insan hafızasında tasarlanamayacak sistemler gelişecek ve hızlı prototipleme sistemleri geleneksel üretim yöntemlerinin önüne geçecektir. Ülkemizde kullanımı artmakta olan bu teknoloji, geliştirmekte olan sanayimize çok ciddi katkılar sağlayacaktır.

1.1. Hızlı Prototiplemenin Tarihçesi

Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki hızlı ve güçlü ilerlemeler; üretimlerin de artık geleneksel yöntemlerin aksine, daha hızlı yapılabileceğinin göstergesi olmuştur. Bu gelişmeler günden güne üretim teknolojilerine de yansımış; bununla birlikte üretimler daha hassas ve çabuk yapılabilmeye başlanmıştır.

Örneğin önceleri tasarımların oluşturulması, boyutlandırılması ve üretilip sonuçlandırılarak bir ürünün piyasa sürülmesinde insan gücü oldukça fazla kullanılmaktaydı. Tüm çizimler elde yapılmakta ve insan gözüyle kontrol edilmekteydi. Bunların yerini CAD olarak anılan bilgisayar destekli tasarım yazılımları alarak, gerek 3 boyutlu modellerin gerekse bunların

teknik resimlerinin bilgisayar ortamında daha güvenilir ve çabuk yapılmasını sağlamıştır. Parça üretimi ise tekrar çoğunluk olarak insan gücüne dayalı olarak üretilmekteydi. Bunların yerini de CAM olarak anılan Bilgisayar Destekli Üretim yazılımları olarak üretimlerin nümerik kontrollü tezgâhları geleneksel tezgâhlardakine göre daha hızlı yapılması sağlanmıştır.

Tüm bu gelişmelerden devam ederken, hızlı prototipleme teknolojileri; oluşturulan tasarımların ara kontrollerinin yapılması veya bu prototiplerin fonksiyonel bölgelerde kullanılabilmesinin yolunu açmıştır. Özellikle bir tasarımın sürekli olarak kontrol edilebilmesi, tasarımcılara çok büyük bir çalışma imkânı getirmiştir.

Çizelge 1.1’ de Hızlı Prototipleme ve ilgili teknolojilerin tarihsel kronolojide gelişmeleri verilmiştir:

Çizelge 1.1 Tarihsel gelişim [3]

Yıl	Teknolojideki Gelişmeler
1770	Mekanizasyon
1946	İlk Bilgisayar
1952	İlk Nümerik Kontrollü Takım Tezgahı
1960	İlk Ticari Lazer
1961	İlk Ticari Robot
1963	İlk İnteraktif Grafik Sistemleri
1988	İlk Ticari Hızlı Prototipleme

1986 yılında Chuck Charles Hull tarafından patenti alınan Stereolitografi cihazı ile hızlı prototipleme teknolojilerinin doğuşu gerçekleştirilmiştir. O güne kadar 3 boyutlu baskı hayallerinin takibi sürekli olarak devam etse de Charles Hull hızlı prototipleme sistemlerinin babası olarak kabul edilmektedir. [4]

1986 yılında 3D Systems firması kurulmuş, ticari olarak ilk hızlı prototipleme ise 1988 yılında gerçekleşmiştir. Takip eden yıllarda hızlı prototip cihazlarına servis hizmeti veren firmalar ve cihaz üreticisi olan diğer firmaların sayısı ise 1992 yılında 10’ a yaklaşmıştır. Ayrıca bu yıllarda üniversite araştırmaları ve konferanslar yapılmaya başlanmıştır. 1993 ilk olarak hızlı kalıplama terimi ve hızlı prototipleme sistemleriyle bütünleşik olarak kullanılma fikri ortaya atılmıştır.

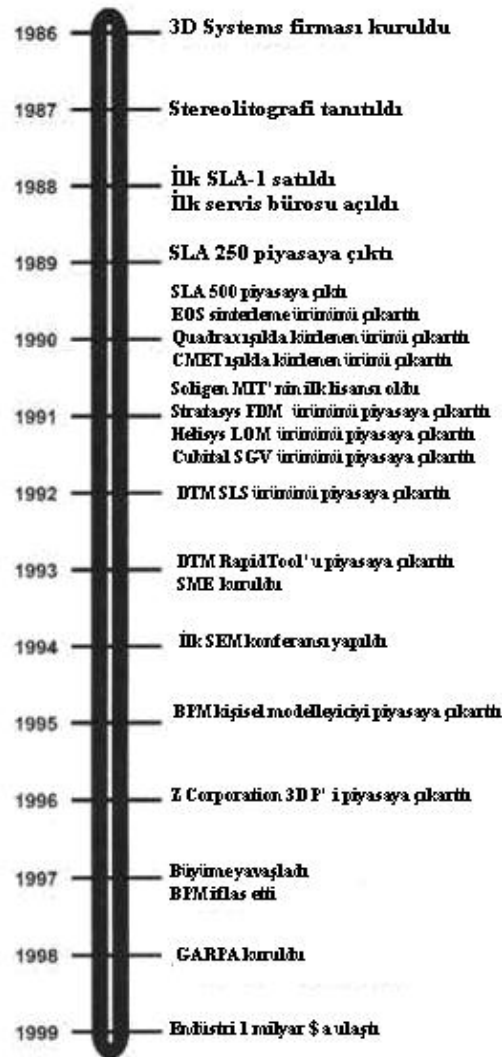
90’ lı yılların başından sonuna kadar devam eden bu çalışmalar neticesinde, birçok firma kurulmuş, çeşitli alanlarda araştırmalar yapılmış ve tüm bu teknolojik gelişmelerin ortak bir

çatıda toplanması için GARPA-Hızlı Prototipleme Kurumlarının Global Birliği 1998 yılında kurulmuştur.

İlerleyen yıllardan günümüze hızlı prototipleme teknolojilerinin kullanım alanları artmış ve mevcut teknolojinin her geçen gün ilerlemesi sağlanmıştır. 30 yıl önce insanlık tarafından sadece tasarlanan bu hızlı prototipleme endüstrisi günümüzde 1 milyar dolarlık bir sektör haline gelmiştir.

Çizelge 1.2.' de hızlı prototipleme teknolojilerinin dönüm noktaları verilmiştir:

Çizelge 1.2. Hızlı prototipleme teknolojilerinin gelişimindeki önemli tarihler [4]



Prototipleme son ikisi geçen 20 yılda gelişen üç fazdan oluşmuştur: [3]

Birinci Faz (Elle prototipleme) yüzyıllar önce başlamıştır. Bu fazda prototipler çok karmaşık değildir ve prototiplemenin fabrikasyonu parçaya göre ortalama dört hafta sürmektedir. Prototipin yapımında kullanılan teknik, sanatsal ağırlıklıdır ve emek gerektirir. [4]

İkinci Faz (Soft ya da Sanal prototipleme) yukarıda da bahsedildiği gibi son 20 yılda ortaya çıkmıştır. Bu bilgisayarda oluşturulan modellere fiziksel modellere uygulanacak olan her türlü test, analiz ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca bu dönemde gereksinim duyulan parçalar bir önceki faza göre en az iki kat daha karmaşık hale gelmiştir ve fiziksel modellerinin yapımı yaklaşık olarak 16 haftayı bile bulmaktadır. Hassas CNC nitelikli makinelerin geliştirilmesiyle bile fiziksel prototip üretimi halen ustalık ve sanat isteyen yöntemlere dayanmaktadır. [4]

Üçüncü Faz (Hızlı Prototipleme) fiziksel parçaların hızlı prototiplenmesi, masa üstü üretim ya da katman üretim teknolojisi olarak da adlandırılmaktadır. Özellikle karmaşık parçaların imalatında çok büyük zaman kazancı sağlanmaktadır. Günümüzde her sektörde gereksinim duyulan parçaların eskiye göre en az kat daha karmaşık olduğu düşünülürse şu an böyle bir parçanın imalatı için yalnızca üç hafta gerekmektedir. 1988'den bu yana yaklaşık 20 farklı teknik geliştirilmiştir. [4]

Çizelge 1.3' te geometrik modelleme ve prototipleme arasındaki paralellikler verilmiştir.

Çizelge 1.3. Modelleme ve prototipleme arasındaki paralellikler [4]

Geometrik Modelleme	Prototipleme
1. Birinci Faz: İki boyutlu tel kafes sistemi 1960'ların ortasında başladı. - Gösterim bir elektrik devresine basılmış devre yolu ya da bir mekanik komponentin teknik resmi biçimindedir - Doğal çizim teknikleri	1. Birinci Faz: Elle prototipleme - Geleneksel olarak yüzyıllar öncesinden başlamıştır. - Elle prototipleme, ustalık ve beceri ister. - Doğal prototipleme teknikleri
2. İkinci Faz: Üç boyutlu eğrisel ve yüzeysel prototipleme 1970'lerin ortasında başladı ve karmaşıklık arttı. - Parçanın şekli, boyutları ve yüzey konturları bilgileri fazlalaştı.	2. İkinci Faz: Soft ya da sanal prototipleme 1970'lerin ortasında başladı. - Karmaşıklık arttı. - Sanal ortamdaki prototip çeşitli mekanik ya da başka özellikleri için test edilebilir hale geldi.
3. Üçüncü Faz: Katı modelleme 1980'lerin başında başladı. - Tutarlı bir form oluşturmak için kenarlar, delikler ve yüzeyler beraber örülmeye başlandı. - Bilgisayar bir nesneyi dıştan içe doğru hesaplayabilmektedir. - Artık belirsizlik ortadan kalkmış ve her şey kesindir.	3. Üçüncü Faz: Katı modelleme 1980'lerin ortasında başladı. - Hızlı prototiplemenin yararı katı bir parçanın işlem süresinin kısa olmasıdır. - Prototipler testlerde kullanılabilir. - Prototip aynı zamanda üretimde de birebir olarak kullanılabilir.

Hızlı prototipleme her geçen yıl endüstride güçlü bir konuma gelirken, hiçbir yavaşlama işareti göstermemiştir. Ayrıca, bu endüstri aracına adaptasyonun yükselmesinin teşvik eden birçok değişik seçenekler de büyümektedir. [5]

1.2. Hızlı Prototiplemenin Esasları

Genellikle hızlı prototipleme sistemlerinin temeli aşağıdaki beş adıma dayanır. Bunlar;

- Tasarımın 3 boyutlu modelinin oluşturulması
- Bu modelin STL verilerine dönüşümü
- Oluşturulan STL verisinin katmanlara ayrılması

- Bu katmanlardan yöntemine göre parçanın oluşturulması
- Oluşturulan parçanın son işlemleri (temizlik vb.)

Bu adımları incelersek;

3 boyutlu modelin oluşturulması; bir yazılım aracılığı ile istenilen parçanın dijital ortamda birebir oluşturulması anlamına gelmektedir. Bugün piyasada bulunan birçok yazılım sayesinde artık tasarımcılar; bu işlemi kolayca gerçekleştirebilmektedirler. Ya da günümüz teknolojisinde lazer sayısallaştırıcı gibi yöntemlerle de istenilen parçanın nokta bulutları oluşturularak yüzey modeli oluşturabilmektedir.

Oluşturulan bu model daha sonra 3D Systems firması tarafından geliştirilen STL formatına çevrilir. 3 boyutlu modelin oluşturulmasında kullanılan CAD yazılımlarının çoğunda; yazılımın ana uzantısından STL formatına dönüşüm sağlanabilmektedir. STL verisine dönüştürülen modelde, istenilen parça; tanımlanan boyuttaki üçgenlere ayrılmaktadır. Üçgenlerin boyutları ne kadar küçük olursa; verinin hassas fakat bir o kadar da fazla yer kaplayacağı unutulmamalıdır.

Modelin STL verisi oluşturulduktan sonra; prototipi oluşturmada önceki adım olan; katmanlara ayırma işlemi yapılmalıdır. Bunun için kullanılan yazılımlar STL modeli 0.01–0.8 mm arasında katmanlara ayırmaktadır. Günümüzde kullanılan hızlı prototipleme cihazlarının birçoğunda kendine ait yazılımlar mevcuttur. Ayrıca prototipin üretilmesi sırasındaki olması gereken destek parçalar da bu yazılımlar sayesinde yapılabilir. STL modelin hızlı prototipleme tekniğine göre belirlenen katman kalınlıklarına ayrılmasından sonra sıra prototipin üretilmesine gelir. Bu belirtilen katman kalınlıkları ne kadar düşük olursa oluşan prototip o kadar hassas olacaktır.

Parça üretildikten sonra ise son işlemleri yapılmalıdır. Bu son işlemler ile anlatılmak istenen; oluşturulan parçanın fazlalıklarını (yukarıda anlatılan destek parçalar vb.) ve genel temizliğini yapmaktır. Bu aşamadan sonra prototip üretimi tamamlanacaktır. Bu temel beş adımın kendi içinde birçok parametreleri olup; kendi içlerinde birçok değişkenlik gösterebilirler.

1.3. Artık Gerilme

Yerçekimi dahil, bir dış yük uygulaması veya bir sıcaklık değişimi gibi başka bir gerilme kaynağı olmadan malzeme hacminde bulunan gerilme durumudur; ve bu tip gerilmeler artık veya iç gerilme olarak adlandırılır. Tüm artık gerilmeler kendilerini dengeleyici sistemlerdir ve sonuçta ortaya çıkan kuvvet ve momenti sıfırlamak zorundadırlar. [6] Isıl işlem, ekstrüzyon, kaynak, kaplama ve işleme gibi tüm termo-mekanik üretim prosesleri endüstriyel ürünlerde artık gerilmelere sebep olabilir, komponentin üretiminden en son kullanımına kadar olan ömrünün her safhasına oluşabilir veya değişebilirler. [7, 8]

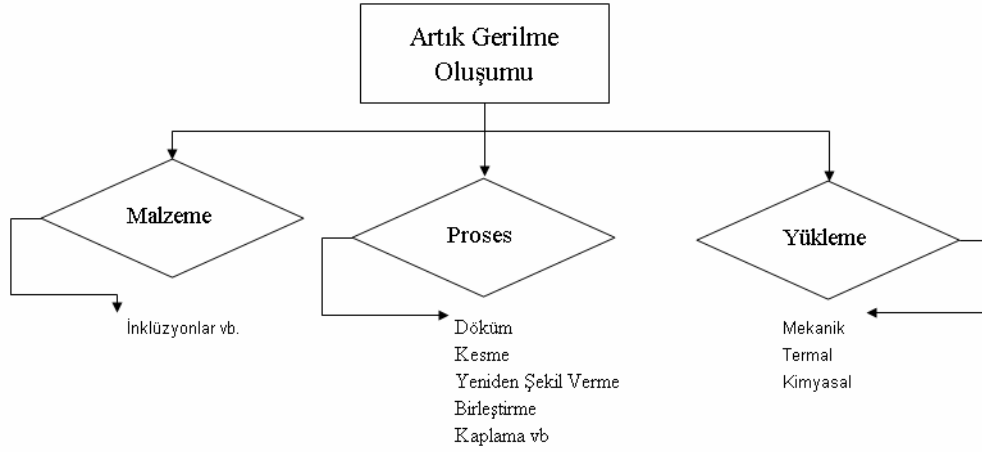


Şekil 1.2. Artık gerilmelerin etkisi olan çelik konstrüksiyon

Artık gerilmelerdeki dikkat edilmesi gereken nokta, mevcut ve/veya potansiyel oluşabilecek artık gerilmelerin büyüklüğü ve bunların parça içerisinde nasıl dağılım gösterdiğinin incelenmesidir.

Artık gerilmeler, yukarıda belirtildiği üzere üretim prosesleri sırasında ortaya çıkan ve parça içerisinde hapsolmuş gerilmelerdir, çalışma performansına olumlu/olumsuz etki yaparlar. Buradan da anlaşılacağı üzere artık gerilmeleri bütünüyle zararlı görmek yanlıştır. Örneğin parça yüzeylerinde meydana gelen ve genellikle yorulma, hızlı soğutma sonucu oluşan çatlamları ve gerilmeli korozyon çatlamları gibi durumlara sebebiyet veren “çekme artık gerilmeleri” genellikle istenmeyen durumlardır. Buna karşın, yüzeyde oluşan “baskı artık gerilmeleri” ise yorulma dayanımını ve gerilmeli korozyon çatlamlarına direnci arttırdığından yararlıdırlar. [9]

Çizelge 1.4. Artık gerilme kaynaklarının şematik gösterilmesi [10]

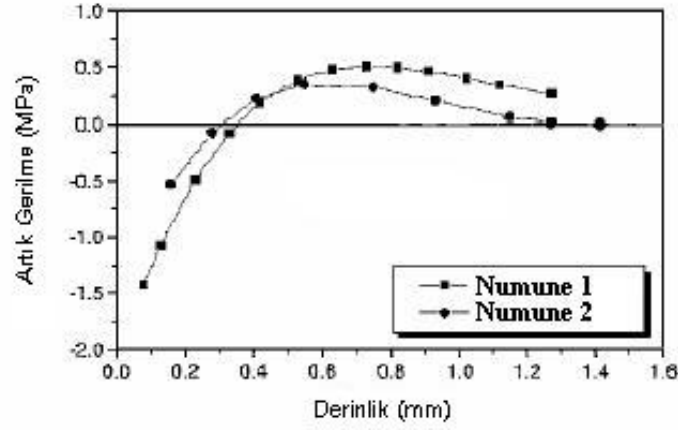


1.4. Literatür Araştırması

Günümüzde artık gerilmelerin belirlenmesinde birçok araştırma yapılmaktadır. Artık gerilme ölçüm yöntemleri çok geniş kapsamlı olup; ölçüm yönteminin seçimi birçok parametreye bağlıdır.

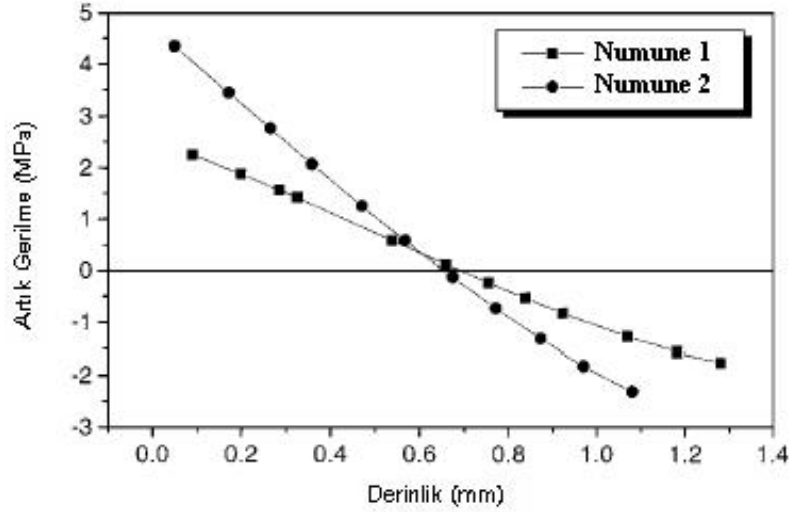
Metal ve/veya metal dışı malzemeler ile üretimi yapılan parçalarda artık gerilmelerin incelenmesi çalışmalarının yanı sıra kullanım alanı her geçen artmakta olan hızlı prototipleme yöntemleriyle üretilen mühendislik parçalarında da, artık gerilmelerin bu yöntemler ile üretilen malzemelerde nasıl bir etkidiği bir araştırma konusu olmuştur. Artık gerilmelerin belirlenmesi delik delme, katman kaldırma, X-ray kırınım gibi yöntemler kullanılarak yapılmıştır.

Turnbull ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada, enjeksiyon yöntemiyle üretilen polimer bazlı malzemelerde artık gerilmeleri katman kaldırma, delik delme ve kimyasal prob yöntemlerinin kullanarak incelemiştir. [11] Katman kaldırma yöntemiyle yaptıkları incelemelerinde, polikarbonat, dolgulu ve dolgusuz ABS esaslı malzemeleri kullanmışlardır. 150x150x2.5 mm boyutlarındaki plaka numunelerde; dolgusuz ABS parçalarda gerilme değerleri yüzeyden 100–300 µm uzaklığında basma gerilmesi şeklinde ve en yüksek 1.4 MPa değerindedir. 300 µm’ den sonra ise gerilmeler çekme gerilmesine en yüksek 0.5 MPa değerine ulaşarak dönüşmektedir.



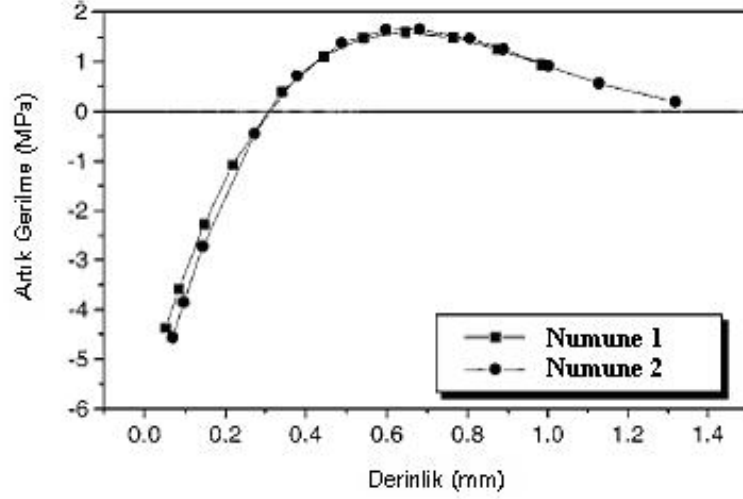
Şekil 1.3. Dolgusuz ABS numunelerdeki artık gerilmeler [11]

Dolgulu ABS malzeme ise 100–600 μm derinliklerde en yüksek 2.5 MPa değerinde çekme gerilmesine sahipken, daha büyük derinliklerde ise 1.75 MPa değerine yaklaşan basma artık gerilmesine sahip olmaktadır.



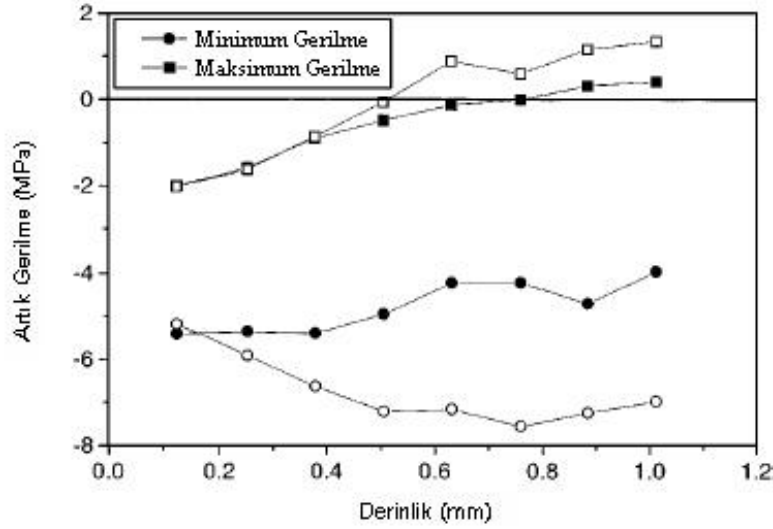
Şekil 1.4. Dolgulu ABS numunelerdeki artık gerilme dağılımı [11]

Nylon malzemelerde ise; 100–300 μm derinliklerde en yüksek 4.5 MPa çekme artık gerilmesi, daha büyük derinliklerde ise en yüksek 1.5 MPa değerine ulaşarak basma artık gerilmesi haline geçmektedir.



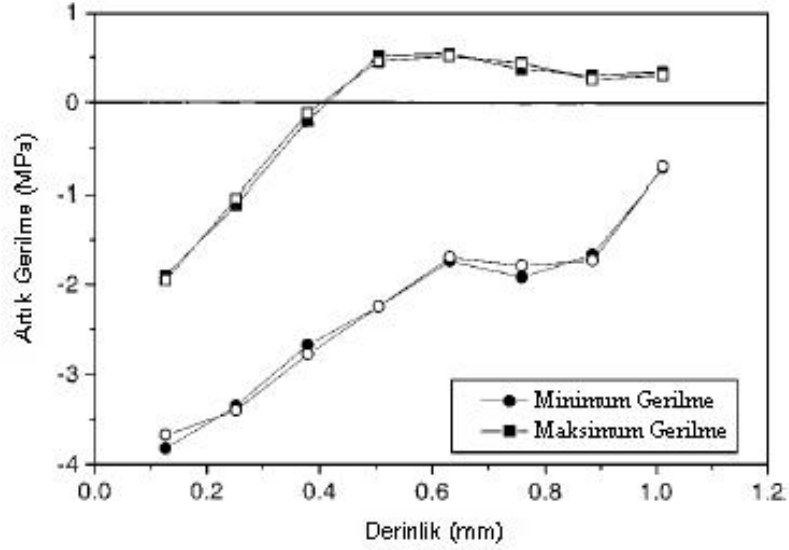
Şekil 1.5. Nylon numunelerdeki artık gerilme dağılımı [11]

Delik delme yöntemiyle ise dolgusuz ABS ve Nylon malzemeler için artık gerilmeleri incelemişlerdir. Dolgusuz ABS malzemede 100–600 μm derinliklerde en yüksek 1.5 MPa değerinde basma artık gerilmesi değeri hesaplanırken, daha büyük derinliklerde ise yaklaşık 1.25 MPa değerine yaklaşan çekme artık gerilmesi değeri bulunmuştur.



Şekil 1.6. Dolgusuz ABS numunelerdeki artık gerilme dağılımı (delik delme yöntemi) [11]

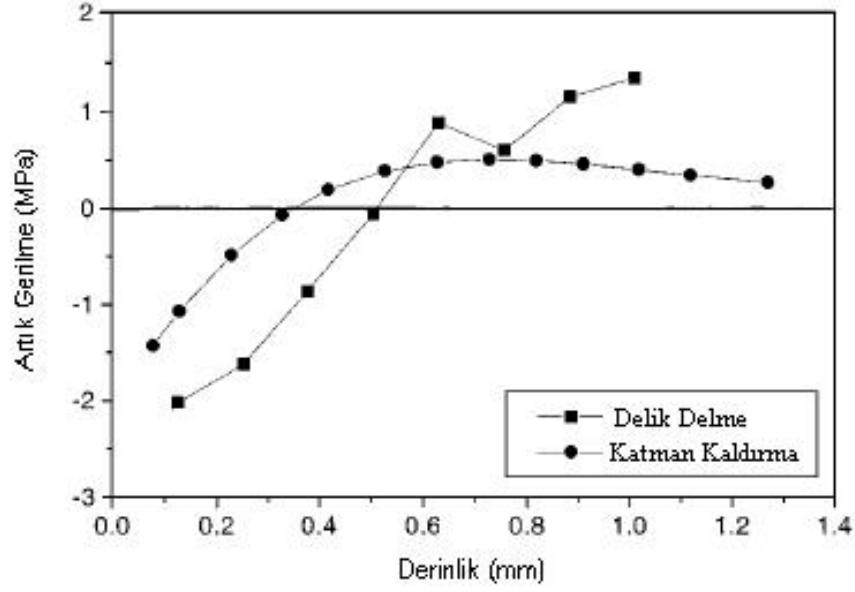
Nylon malzeme için; 100–400 μm derinliklerde en yüksek 2 MPa basma artık gerilmesi, daha büyük derinliklerde ise yaklaşık 0.5 MPa değerine ulaşarak çekme artık gerilmesi elde edilmiştir.



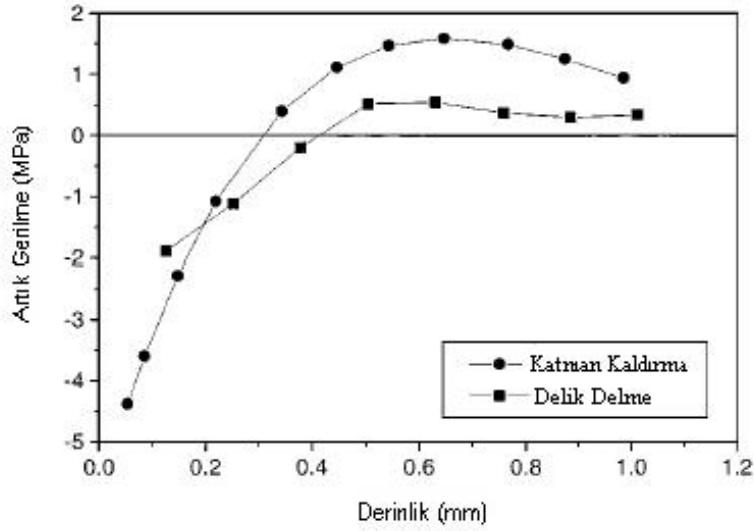
Şekil 1.7. Nylon numunelerde artık gerilme dağılımı (delik delme yöntemi) [11]

Turnbull ve arkadaşları, katman kaldırma ve delik delme yöntemlerinin aynı eksen (akış yönüne dik) için karşılaştırma yapıldığında oldukça tutarlı sonuçlar verdiği sonucuna ulaşmışlardır. Buna rağmen akış yönüne paralel ekseninde delik delme yöntemiyle elde edilen artık gerilmelerin tüm derinlik boyunca basma şeklinde oldukları sonucuna ulaşmışlardır.

Turnbull ve arkadaşları dolgusuz ABS ve Nylon numuneler üzerindeki deneysel çalışmalar neticesinde katman kaldırma ve delik delme yöntemleriyle elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Şekil 4.5 ve 4.6' dan da görülebileceği üzere maksimum gerilmeler katman kaldırma yöntemiyle bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve sonuçlardaki eğilimler kabul edilebilirdir. Fakat delik delme yönteminde, uzamaların analizi için teorik temel; delik derinliklerinin dağılımı üzerinde artık gerilmelerde geniş değişiklikler oluşturmadığı not edilmelidir. Belki de bu; gerilme gradyeninin daha düşük olduğu kalın numunelerde daha kabul edilebilir bir durumdadır [11].



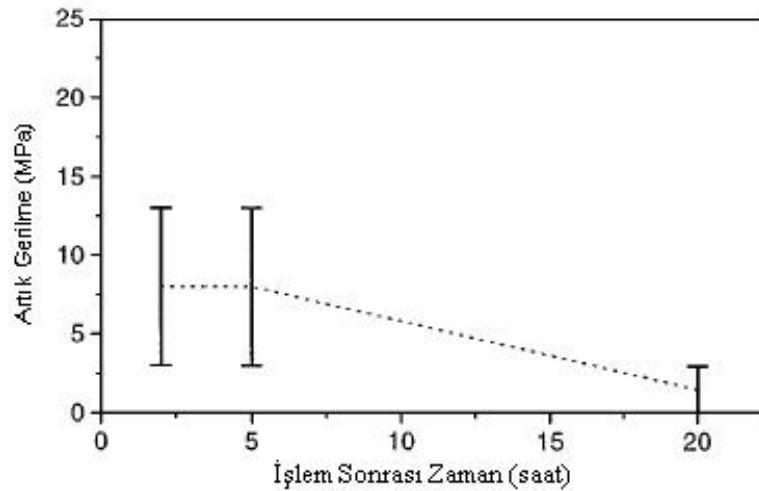
Şekil 1.8. Dolgusuz ABS numunelerde artık gerilmelerin delik delme ve katman kaldırma yöntemleriyle elde edilen sonuçları [11]



Şekil 1.9. Nylon numunelerde artık gerilmelerin delik delme ve katman kaldırma yöntemleriyle elde edilen sonuçları [11]

Kimyasal prob tekniği gerilme ve kırılma arasındaki bağıntı için referans bilgisi kurma temeline dayanır. Bir plastik malzeme özel bir zaman diliminde bilinmeyen bir artık gerilmeye maruz bırakıldığında; çatlama ve/veya kırılma oluşması gerilmenin referans değerinin üzerinde veya altında olduğunu gösterecektir. Turnbull ve arkadaşları; katman

kaldırma ve delik delme yöntemleriyle artık gerilmeleri incelemelerinin yanı sıra; bu yöntemi de kullanarak gerilmeleri belirlemişlerdir. Dolgusuz ABS ve polikarbonat numunelerin havada sırasıyla 2, 5 ve 20 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmalarından sonra işlemi gerçekleştirmişlerdir. Referans veri olarak polikarbonat ve tavlanmış ABS malzemelerden elde edilen bilgileri kullanmışlardır. Polikarbonat numuneler 3:1 oranında propanol karışımına maruz bırakılmış ve kırılma gözlenmemiştir ve artık gerilme değerlerinin 2.5 MPa' dan az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Dolgusuz ABS malzemeler için 2 ve 5 saat yaşlandırma işlemi gören numuneler %100 asetik asit karışımında kırılmış fakat %70 karışımında bu kırılma gözlenmemiştir. Artık gerilme değerleri 3–13 MPa arasında değişmektedir. 20 saat yaşlandırılmış ABS numuneler %70 ve %100 asetik asit karışımında kırılmaya uğramamış ve 3 MPa değerinde gerilme oluşmuştur. Turnbull ve arkadaşları, kimyasal prob tekniğiyle ise diğer yöntemler ile saptanamayacak yüzeye çok yakın artık gerilmeleri hesaplamışlardır.



Şekil 1.10. Kimyasal prob tekniği kullanılarak bulunan artık gerilme değerleri [11]

Karalekas, Rapti ve arkadaşları; akrilik tabanlı ve epoksi tabanlı stereolitografi fotopolimer reçine sistemlerinin çekinti karakteristiklerini araştırmak için yaptıkları çalışmada; fotopolimer reçineleri lazer kürlenme, UV ışınları altında kürlenme ve ısı etkisi altında bırakarak oluşan çekintileri incelemişlerdir [12]

Reçine malzemesi olarak SL parçalarında sık kullanılan; akrilik bazlı fotopolimer EXACTOMER 2202SF ve epoksi bazlı SOMOS 7110 kullanmışlardır. Bütün test numuneleri 0,05 mm tarama boşluğu ve 0,35 mm kürlenme derinliği kullanılarak üretilmiştir. 0.156 mm katman kalınlığı kullanarak oluşturulan 10x10x3 mm plaka numunelerde artık gerilmeleri

incelemişlerdir. Numunelerin yarısı bir UV kamarasında 4 saat süreyle tutulmuş ve daha sonra aynı sürede 60 °C fırına konulmuşlardır.

Hesaplama sonucu en yüksek delik derinliğindeki artık gerilmelerin araştırılan son işlemlerin bir fonksiyonu ve karakteristik olarak artık gerilme değerlerinin deneysel olarak hesaplanan akma gerilmesinin altında olduğu sonucuna varmışlardır. Lazer kürlenmiş (green – state) durumdaki numuneler için en düşük artık gerilmenin bulunduğu ve gerilmenin sonradan kürlenme işlemlerine maruz bırakıldıklarında yükseldiği sonucuna ulaşmışlardır. Green state’ te gerilme değerleri en yüksek 1.5 MPa ve en düşük 0.5 MPa değerleri arasında değişirken, UV ve termal olarak kürlenme işlemlerine tabi tutulduklarında bu değerlerin sırasıyla yaklaşık en yüksek 3 MPa, en düşük 1.5 MPa ve en yüksek 3.5 MPa, en düşük 2 MPa değerlerine ulaştığı sonucunu elde etmişlerdir.

Çizelge 1.5. Epoksi bazlı reçinelerdeki bulunan artık gerilme değerleri [12]

Green - state		UV kürlenme		Termal kürlenme	
σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}	σ_{max}	σ_{min}
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
1425	462	2798	1433	3379	2112

Karalekas ve Rapti diğer bir çalışmalarında stereolitografi numunelerde polimerizasyon sonucu oluşan artık gerilmeleri delik delme yöntemiyle incelemişlerdir [13]. Delik delme neticesinde oluşan uzamaları strain gaugeler kullanarak saptamışlardır. Numunelerde epoksi bazlı fotopolimer malzeme olan Somos 7110 kullanmışlardır. Numuneler 60 mm çap ve 10 mm kalınlığa sahip ve seçilen katman kalınlığı 0.15 mm’ dir. Aynı katman kalınlığına sahip numunelerin tarama boşluğu ve kürlenme derinliğini değiştirerek farklı numuneler elde etmişlerdir. Numunelerin tarama boşlukları ve kürlenme derinlikleri sırasıyla, 0.05/0.35 mm, 0.05/0.45 mm, 0.10/0.45 mm ve 0.15/0.45 mm’ dir. Bu numunelerdeki artık gerilme ölçümleri green state; UV kamarası ve termal exposure uygulanarak yapılmıştır.

Artık gerilme ölçümü için numuneler üzerine 1,59 mm çapında ve 1,9 mm derinliğinde delik delinmiştir. Delik delme sonucu oluşan uzamalar mikro ölçüm yapabilen strain gaugeler kullanılarak yapılmıştır.

Deneyler sonucunda, UV kamarasında bir son kürlenme işlemine tabi tutulan numunelerde mekanik özelliklerin fazla iyileşmediği fakat 80 °C’ de 2 saat süreyle termal olarak kürlenmeye tabi tutulan numunelerde küçük bir artış olduğu görülmüştür. Numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda en düşük artık gerilmelerin üç kürlenme yönteminde de 0.05/0.15 mm parametreleri sahip numunelerde olduğu saptanmıştır. Green state’ te farklı parametrelerle ile üretilen 4 farklı numunede en yüksek gerilme değeri yaklaşık 1,5 ile 3,5 MPa, en düşük gerilme değerinin ise yaklaşık 0,5 ile 2,5 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, UV kamarasında son kürlenmeye tabi tutulan numunelerde en yüksek gerilme değeri yaklaşık 2,5 ile 4 MPa, en düşük gerilme değerinin ise 1,5 ile 3 MPa arasındadır. Termal kürlenme işlemine tabi tutulan numunelerde ise en yüksek gerilme değeri yaklaşık 3,5 ile 6 MPa, en düşük gerilme değerinin ise yaklaşık 2 ile 4,5 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir.

Çizelge 1.6. Hesaplanan artık gerilme değerleri [13]

İnşa Parametreleri	- σ_{max} (Mpa)	- σ_{min} (Mpa)	- σ_{max} (Mpa)	- σ_{min} (Mpa)	- σ_{max} (Mpa)	- σ_{min} (Mpa)
0,05/0,35	1425	462	2798	1433	3379	2112
0,05/0,45	3207	2394	4075	2500	5851	4659
0,10/0,45	3648	2294	3894	2803	5314	3871
0,15/0,45	3161	1710	4081	2028	5297	3478

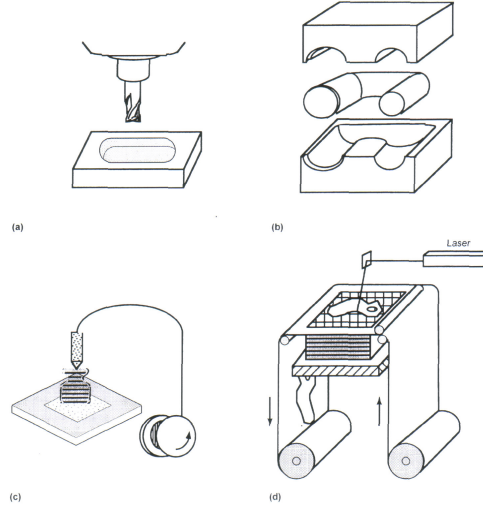
Bu çalışma sonucunda Karalekas ve Rapti epoksi bazlı fotopolimer reçinelerdeki artık gerilmelerin oldukça düşük olduğu sonucuna varmışlar ve çekme dayanımının yaklaşık % 6,5’ u oranında olduğunu saptamışlar, ayrıca numunelerin üretim ve son işlem parametrelerinin çok önemli derecede değişmediğini gözlemlemişlerdir.

2. HIZLI PROTOTİPLEME

2.1. Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Sınıflandırılması

Genel olarak üretim tekniklerini sınıflandırmanın birçok yolu olsa da; bunlardan biri parça şekillendirme prosesinin mekanizmasına bağlı olarak yapılan sınıflandırmadır. Bu şekilde üretim prosesleri dört kategoriye ayrılabilir:

- Eksiltici prosesler
- Şekil verilen prosesler
- İlave yapılan prosesler
- Hibrid prosesler [5]

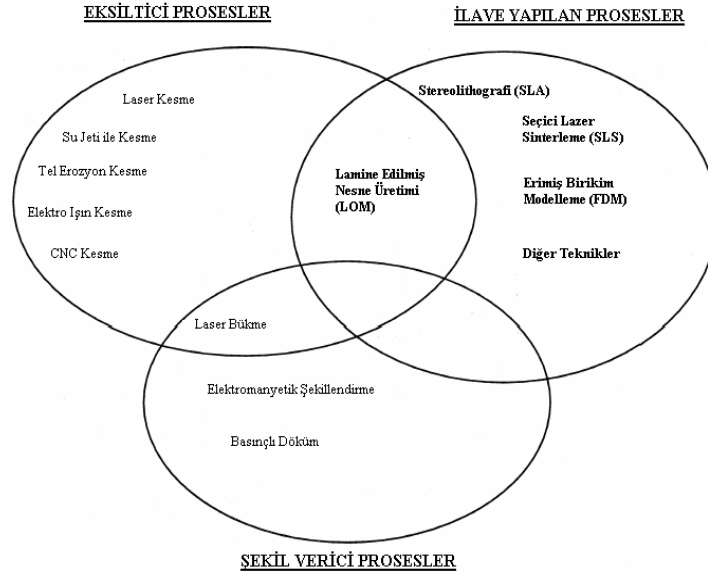


Şekil 2.1. Dört temel üretim prosesi: (a) eksiltici prosesler (b) şekil verilen prosesler (c) ilave yapılan prosesler (d) hibrid prosesler [5]

Birçok geleneksel üretim prosesi eksiltici ve şekil verici proseslerin alt kategorileri olarak sınıflandırılrsa da; hızlı prototipleme sistemleri ilave yapılan ve hibrid prosesler olarak sınıflandırılabilir. [5]

Marshall Burns; hızlı prototipleme teknolojilerini otomasyon halindeki üretim olarak tanımlamıştır. Burns' e göre bir prosesin hızlı prototip olarak sınıflandırması için aşağıdaki kriterleri yerine getirmesi gerekir:

- Proses, şekli belli olmayan bir ham malzemeden; boyutları belli olan bir parça üretmelidir.
- Proses bu üretimi gerçekleştirirken önemli bir insan etkisi kullanmamalıdır.
- Proses parça şeklini 3 boyutlu geometriden oluşturmalıdır.
- Proses her farklı şekli oluştururken farklı üretim araçları kullanmamalıdır.
- Proses bir montaj ve/veya birleştirme işlemi değil tek bir parça üretmelidir. [14]



Şekil 2.2. Üretim proseslerinin sınıflandırılması [6]

Şu anda ticari olarak kullanımda olan 6 değişik hızlı prototipleme teknolojisi mevcuttur ve her biri kendi içinde güçlü yanlara sahiptir. Bu teknikler artık günümüzde prototipleme yapılmayan uygulamalarda bile kullanım alanlarını yükseltmektedirler.

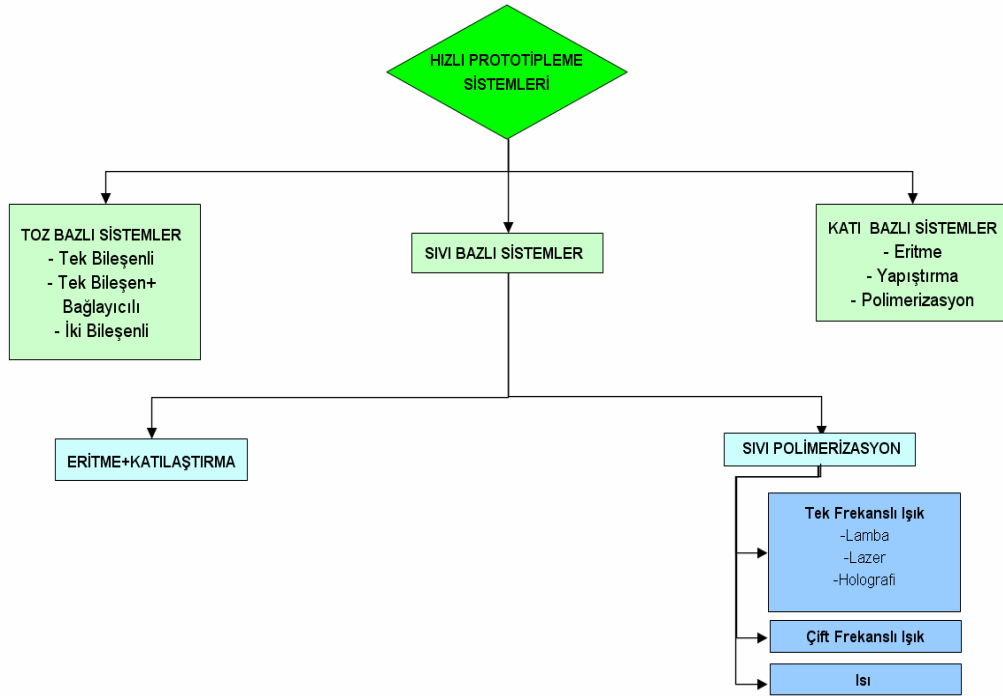
Hızlı prototipleme teknolojileri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Katmanların oluşturulma tekniği ve inşa hammaddesi olarak kullanılan malzemenin özelliği çok farklı olabilmektedir. Buna bağlı olarak hızlı prototip cihazları, kullandığı teknolojiye göre, Işıklı Kür, Toz Bağlama, Harç Yığma ve Tabaka Yığma olarak dört ana kategori altında toplanabilir ve Çizelge 2.1' den görüleceği üzere her ana kategorinin alt kategorileri mevcuttur:

Çizelge 2.1. Hızlı prototipleme teknolojilerinin işlem teknolojisine göre sınıflandırılması



Çizelge 2.2. Hızlı prototipleme sistemlerinin kullanılan malzemeye göre sınıflandırılması [3]

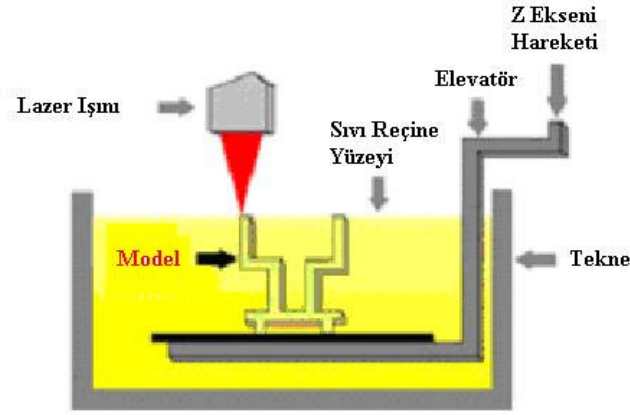


Bir hızlı prototipleme sistemini kullanmadan ve/veya satın almadan önce yapısal ihtiyaçların belirlenmesi gerekir. Prototipin hangi boyutlarda, hangi kalitede ve ne kadar zamanda olacağı kararı bu noktada çok önemlidir. Aşağıda ticari olarak en sık karşımıza çıkan prototipleme sistemleri açıklanmıştır:

2.1.1. Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi ticari olarak ilk hızlı prototipleme teknolojisi olup, 1986 yılında 3D Systems firması tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde de yaptığı satış itibariyle pazara hâkim durumdadır. Daha sonraları birçok firma bu teknolojiyi kullanarak makineler üretmiştir.

Bu teknikte, bir lazer kaynağından elde edilen ışık enerjisi ile sıvı halde bir kapta birikmiş olan fotopolimer yüzeyinin taranmasıyla gerekli kısımlar kür edilerek sertleştirilir. Bir katman bittikten sonra parçanın bulunduğu platform (elevatör) katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bir kanat yardımıyla yüzeye yeni bir kat sıvı fotopolimer kaplanır. İnşa bittikten sonra platform yukarı çekilir ve manüel olarak destek sütunları kopartılır. [15]



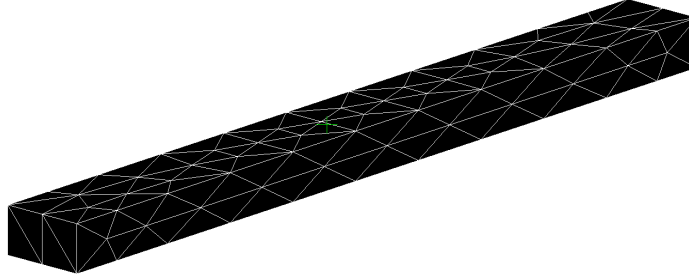
Şekil 2.3. Stereolitografi yönteminin şematik gösterimi [16]

Bu yöntem, katmanlar halinde STL dosyasından elde edilen bilgilerin; bir katı hal lazer kaynağı yardımıyla her katmanın katılaştırılması, her katılaştırmadan sonra parçanın bulunduğu elevatorün aşağı inmesi ve yüzeye yeni bir kat sıvı fotopolimer malzeme kaplanması temeline dayanır. Tüm katmanların katılaştırılması bittikten sonra elevatör yukarı doğru alınır ve destek parçalar koparılır. Parça üstünde fazla sıvı fotopolimer kalmışsa temizlenir.

Aşağıda işlem aşamaları sırasıyla verilmektedir:

Parçanın üç boyutlu CAD modeli tasarlanmaktadır. Şekil 2.4' te görüldüğü üzere parçanın CAD verisinin STL verisine dönüştürülmüş hali görülmektedir. STL verisinde üçgen yapısı

ne kadar küçük olursa küçük detaylar daha düzgün elde edilir fakat dosya boyutları daha fazla olur.



Şekil 2.4. Üretilen parça numunesinin STL verisine dönüştürülmüş hali

Dilimleme

SLA yazılımında CAD verisinden dönüştürülen STL verisi dilimlenme işlemine alınır. Bu dilimlenme işlemi sırasında parça yatay olarak seçilen katman kalınlığı kadar düzlemlere ayrılır. Burada önemli olan nokta kullanılan malzemeye göre çekme paylarının düzgün verilmesi gerektiğidir. Ayrıca ölçeklendirme yapılarak parçanın orijinal CAD verisine göre hangi boyutlarda üretileceği seçilmektedir.

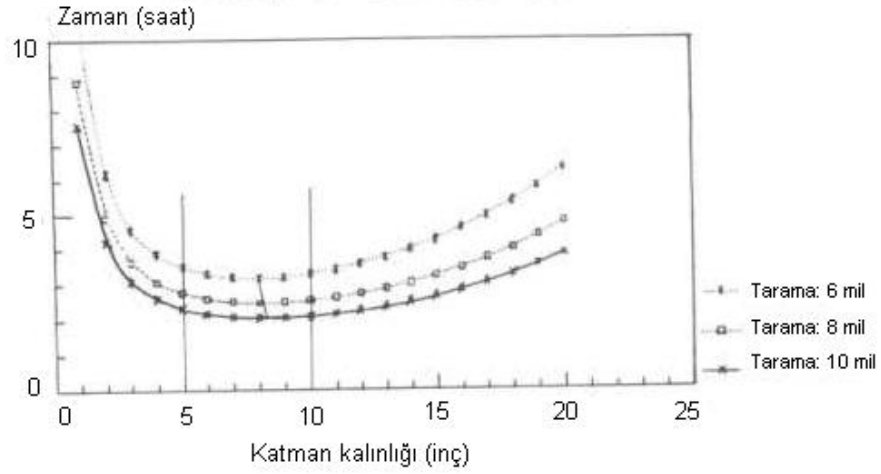
Bir dilim birimi, CAD birimi alanında yazılımın kullandığı değerdir. Yazılım tamsayıya ihtiyaç duymaktadır ve bu sebeple CAD birimi, dilimleme çözünürlüğü adı verilen bir değer tarafından bölünmektedir. Bu değer normal olarak her inç başına 1000–10000 dilim birimi arasındadır (her milimetrede 40–400 dilimleme birimi). Eğer bir parça 2 x 4.556 inç boyutunda ve dilimleme çözülümü 1000 ise parça 2000–4556 dilim birimden oluşmaktadır.

Dilimleme birimlerinde bir boyutun en fazla izin verilen dilimleme değeri 65.535' tir. Bu herhangi bir ekseninde 6,5535 inçten büyük bir CAD değerinde olan parça veya destekler için dilimleme çözünürlüğü 10.000' den az olması gerektiği anlamına gelmektedir. CAD verisi 65.535 inçten büyük olmadıkça, dilimleme çözülümü 1000 değeri ile çalışmaktadır. Dilimleme çözünürlüğü değerinin 1000 olarak kullanılmasının dezavantajı, CAD birimlerini bir inç değerinin en yakın bindelik değerine yuvarlamasıdır. Yani, bir parça 0,9995 x 2,0004 inç boyutlarında ise 1,0000 x 2,0000 inç boyutlarında tanımlanacaktır. 1000 dilimleme çözünürlüğü değeri kullanıldığında bütün katman kalınlıkları ve tarama aralıkları eşit olarak 0.001 ile bölünebilir olacaktır, bu –örnek olarak bu katmanların 0,0025 inç olarak değil 0,003 inç olarak tanımlanmasını sağlayacaktır. [17]

Genel bir yanlış kanıya göre, kalın katman kalınlığı seçilerek daha kısa üretim süreleri elde edilmektedir. Farklı lazer güç seviyeleri için katman kalınlığı ve üretim süresi Şekil 2.5'te verilmektedir. Lazer tarama hızı; artan kürlenme derinliği ile “üstel” olarak azalmaktadır. Bundan dolayı, kalın katmanlar yükselen lazer çizme zamanı ile sonuçlanırlar. Lazer gücüne, reçine foto-hassasiyetine ve taranan alana bağlı olarak; en hızlı katmanlar 0,005–0,01 inç kalınlığında elde edilmektedir. (Şekil 2.5)



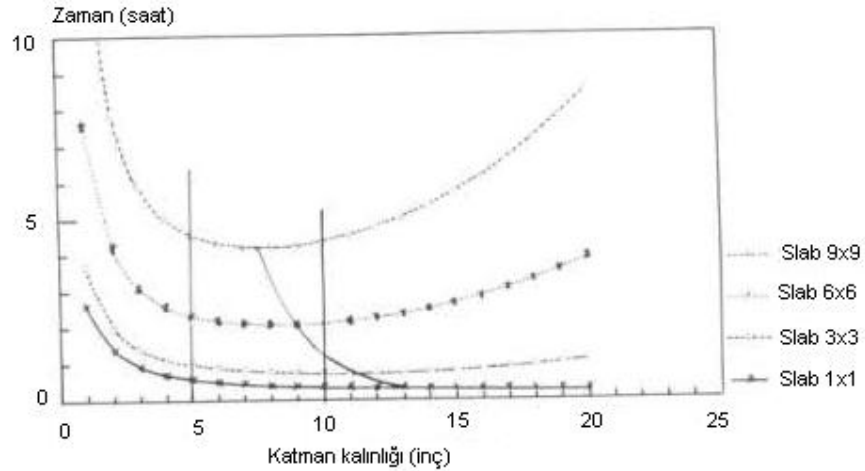
22



Şekil 2.6. Çeşitli tarama boşlukları için katman kalınlığı ve üretim süresi grafiği [17]

Eğer tarama zamanı üretim zamanının çoğunu harcıyorsa, hızı arttırmak için küçük katman kalınlıkları seçilmesi önerilebilir.

Şekil 2.7 ise parça büyüklüğü ve katman kalınlığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Birçok stereolitografi çalışması için kullanılan ve deneysel çalışmalar ile onaylanmış detaylı bir analiz; en hızlı üretim zamanının 8 mil katman kalınlığı için elde edildiğini göstermektedir. 200 mW ve üzeri lazer güçleri kullanıldığında ise 10–12 mil kalınlıklarda da aynı süre elde edilebilmektedir. [17]



Şekil 2.7. Çeşitli parça boyutları için katman kalınlığı ve üretim süresi grafiği [17]

Minimum yüzey açısı (MSA), taranan yüzey boşluklarının hesaplanmasını sağlayan bir parametredir. x-y ekseninden derece olarak ölçülmektedir. Eğer MSA sıfır dereceye ayarlanırsa, sadece yatay yüzeyler doldurulmaktadır. Eğer MSA 50° olarak ayarlanırsa, Eğer MSA 50° olarak alınır, tanımlanmış her bir üçgen 50° veya daha az bir değerdeki açıyla doldurulmaktadır. [17]

Birleştirme

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

Hazırlama

Bu adımda işleme sırasında kullanılacak parametrelerin kesin değerleri seçilir. Bunlar, sıyırıcı elemanın süpürme sayısı ve periyodu ile istenilen z-beklemesidir. Bu, kaplama işleminden sonra sistemin belirli bir süre bekleme yapmasıdır. Amacı, reçine yüzeyindeki düzensizliklerin ortadan kaldırılmasını sağlamaktır. Bu adım sonunda istenilen parametreler seçilir veya daha önceden tanımlanmış değerler alınır.

İşleme

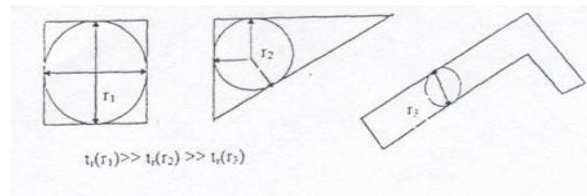
Bu aşamada sıvı fotopolimer malzemenin polimerizasyonu ve parçanın üç boyutlu olarak oluşması başlar.

Seviyeleme

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

Derine Dalma

Bu işlem geniş düz alanlara sahip parçaların uygun bir şekilde kaplanabilmesi için yapılır. Platform destekleri parça gibi aşağıya indirildiğinde reçine yüzeyinde bir basınç meydana gelir. Viskoz akışkanlar dinamiği ve deney sonuçları ile tanımlanan bu yüzey basıncının telafisi için zaman gereklidir. Bu noktada kritik daire yarıçapı (r_{kr}) tabaka kesiti için reçine viskozitesi ile doğru, basınç derinliğinin karesi ile ters orantılı olmaktadır. Bilinen tabaka ve reçine viskozitesi için r_{kr} sabittir. Bir parçada kritik daire, reçinenin akabileceği herhangi bir kesitteki maksimum uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.8’ de değişik kesit örnekleri verilmiştir. Daire yarıçapının artması, parçanın katılma zamanının (t_r) orantılı olarak artmasına neden olmaktadır. [17,18]



Şekil 2.8 Çeşitli parçalar için r_{kr} [18]

Yükseltme

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

Süpürme

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

- Bu işlem hızlı olarak gerçekleştirilir. Parça geometrisinin büyük bir kısmı için en uygun süpürme zamanı 5 saniyedir. Yalnızca hapsolmuş hacimlere sahip parçalar için toplam süpürme zamanı biraz daha artabilir.

- Uygun ve aynı düzeyde ince tabakalar sağlanabilir. Tabaka kalınlıklarındaki ölçülen değişimler çok küçük değerlerdedir.

Dezavantajı ise; hapsolmuş hacimlerin kaplanması sırasında, tabakadaki düzensizliklerin fazla olmasıdır. Yüzey gerilme etkileri süpürme sırasında, reçinenin bıçağın arka kenarına yapışmasına neden olur. Bu da tabakada düzensizliklerin ve şişkinliklerin oluşmasına neden olur.

Eğer reçine polimerizasyon sonucu çekme yapmış ise seviyelendirme işlemi yapılması gerekmektedir. Bu işlem ile reçine seviyesi en uygun lazer odağının sağlanması için uygun bir z seviyesine getirilmektedir. Lazerin her tabakada katılaştırma yapmasından sonra, bir sezgi elemanı yardımıyla reçine seviyesi kontrol edilmektedir. Bu kontrol sırasında seviyenin tolerans sınırları içerisinde 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. [18]

İşleme Pozisyonuna Hareket

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

Z – Beklemesi

Platform işleme pozisyonuna geldikten sonra, önceki tabaka üzerinde kalan reçine kap içerisindeki reçine ile karıştırılmalıdır. Küçük fakat farklı formlardaki kırıksıklıklar, sıvı ile ara katı yüzeyi arasındaki kısmın etrafında görülebilir. Bu etki SLA penceresinden çok küçük açılarda, kaplayıcı bıçak kabın arka kısmında bulunduğu sırada, reçine yüzeyi gözlenerek izlenebilir. Reçine yüzeyinin normal bir düz kenarının sıvıya yansımaları izlenildiğinde, yüzeydeki karışık hareketler gözlenebilir. Kırıksıklığın çokluğu reçine viskozitesine ve yüzey gerilmesine bağlı olan sonlu gevşeme zamanı sabitini bozma eğilimi gösterecektir. Z bekleme aralığı esasen, bu tür düzensizlikleri yok etmek için sıvı yüzeye belli bir süre tanınmasıdır. Küçük düzensizlikler özellikle ince tabakalarda problem yaratırlar. Bu nedenle genelde, kalın tabaka tercih edilmesi durumlarında daha büyük z beklemesi gerekir.

Lazerle Katılaştırma

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

Parça Tamamlama

Verilmiş bir tabaka için yukarıda anlatılan lazer işleminin tamamlanması ile önceki adım (z bekleme), parçanın sonradan gelen tabakaları için de tekrarlanacaktır. Tecrübeler, SLA ile parça imali yapan kullanıcıların %90 'ının işi tamamladığını, %10 'nun ise değişik sebeplerle (güç problemleri, dosya hataları, kötü çalışma vb.) üretim çevrimini durdurduğunu göstermiştir. Bu, karışık parçaların oluşturulmasında dikkate değer bir başarıdır. Son tabaka da tamamlandığında, bilgisayar z eksenini harekete geçirerek, asansör yardımıyla platformu yükselterek parçayı reçinenin serbest yüzeyine çıkarır. [17]

Parça Alma ve Temizleme

Platform ve üzerinde bulunan bitmiş parça makineden alınır. Bu işlem yapılırken ellerin reçine ile temasını önlemek için özel eldivenler kullanılır. Fazla reçinenin platform ve parçadan temizlenmesi gerekir için kâğıt havlular kullanılır. Sonra parça ve platform içinde çözücü bulunan bir temizleme kabına yerleştirilir. Bu aşamanın sonunda parça, fazla reçineden temizlenmiş olur. Böylelikle, parça üzerindeki reçinenin temizlenmesiyle gerçek boyutlardan sapmalar engellenmiş olur. Daha sonra parça ve platform düşük basınçlı hava ile kurutulabilir. Bu şekilde kurutma işlemi hızlandırılmış olur. Bu aşamanın son kısmında parçanın platformdan ayrılması vardır. Genelde bu işlem, düz ağızlı bir kesici yardımıyla desteklerin olduğu kısımdan yapılır. Prototipin kalitesini düşürmemek için bu aşama çok dikkatli uygulanmalıdır. [18]

Son Kurutma

Son kurutma işlemiyle kadar parçanın iç kısımları da polimerizasyona tabi tutulur. Bu şekilde parça, yeşil görünümünden daha iyi mekanik özelliklere sahip prototiplere dönüştürölür. Bu

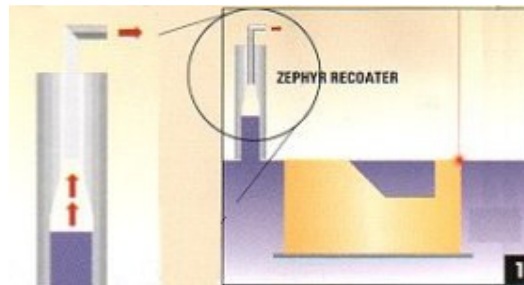
işlem geniş bir bantta veya morötesi ışınların etkidiği bir ortamda yapılır. PCA, kurutma çarpılmalarını minimize eden, efektif bir cihazdır. Yaklaşık olarak bir veya iki saatte çok büyük parçalar kurutulmaktadır.

Son İşlem

İstenilen parçaya göre değişik uygulamalar yapılabilir. Taşıyıcı desteklerin parçadan tamamen uzaklaştırılması gerekir. İsteğe göre kumlama, parlatma, cilalama, boyama veya spreyci metal kaplama gibi işlemler yapılabilir. Bu tür işlemler genelde fonksiyonel modeller için tercih edilir. [19]

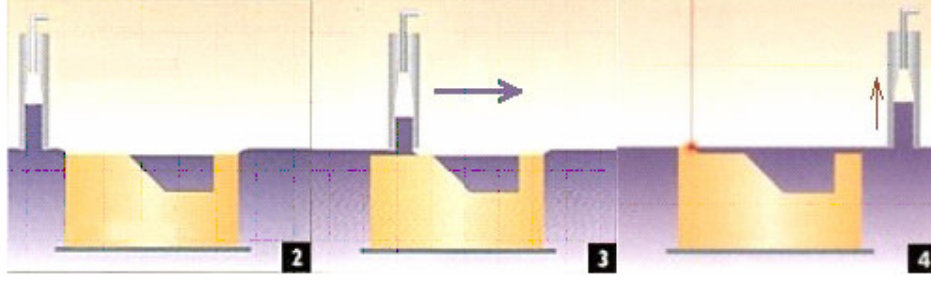
Yapılan bitirme işlemlerinden, sonra sıra parça ve desteklerin birbirinden ayrılmasına gelmektedir. Kırılgan polimerlerde genellikle ayırma işleminde kenarı körleştirilmiş bıçak ve spatula kullanılmaktadır. Dayanımı yüksek olan reçinelerde ise destek uzaklaştırma işleminde daha az problemle karşılaşmaktadır. Daha az kırılgan olmalarından dolayı kolayca kesilmektedir. Ayrıca, bu tip reçinelere frezeleme, tornalama ve delme işlemleri de uygulanabilmektedir [17]

İlk modellerde "doctor blade" ismiyle anılan reçine yayıcı-düzleyici bir kanat kullanan SLA sistemleri 1996'da üretilen SLA-350 den bu yana tüm modellerinde "Zephyr" ticari ismiyle anılan bu gelişmiş sıvı reçine yayma tekniği uygulanmaktadır. Bu yöntemle kullanılan normal kanatçıya nazaran daha hızlı, hassas, düzgün ve ince bir sıvı reçine yayılarak yüksek hassasiyetli modeller daha hızlı inşa edilebilir [20]



Şekil 2.9. Zephyr Recoater sistemi [20]

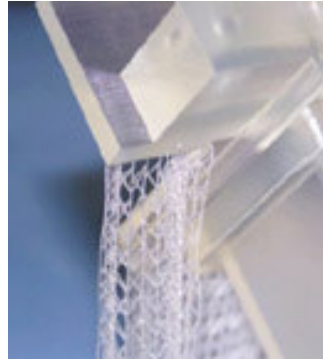
Yukarıdaki resimde de görüldüğü üzere lazer bir katmanın katılaşmasını bitirdiğinde, Zephyr Recoater sıvı yayma için hazırdır. Sarı renkte gösterilen katılaşmış reçine (inşa halindeki parça), mavi renkteki ise sıvı haldeki reçinedir.



Şekil 2.10. Zephyr Recoater sisteminin çalışma prensibi [20]

Şekil 2.10' da bulunan Resim 2' de yeniden sıvı kaplama öncesi parça bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilirken, Resim 3' te ise Zephyr Recoater hareket ederek parça yüzeyine ince ve düzgün bir şekilde sıvı reçineyi yayar. Resim 4' te ise lazer bir sonraki katmanı katılaştırmaya başlar ve bu arada vakum ile hazneye yeniden sıvı reçine çekilir. [20]

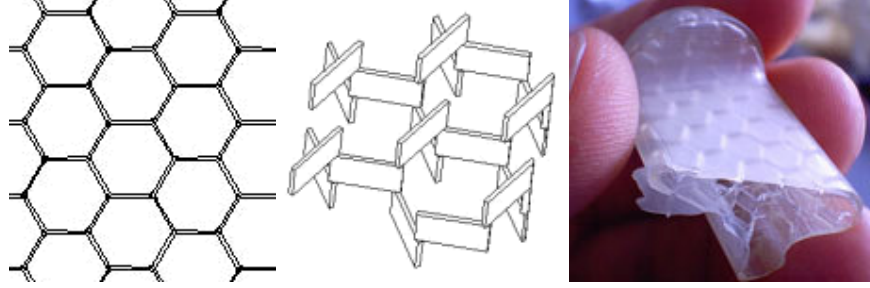
Destekler; kaplayıcı elemanın parçanın üretildiği platforma çarpmaması, platformdaki olası bir çarpılmanın parça işleme sırasında problem çıkarmaması, platformdan yükselen parçanın üst kısımlarının parçanın imalatının bitimine kadar desteklenmesi ve parçanın imalatı bittiğinde platformdan kolaylıkla ve hasara uğramadan alınabilmesi için kullanılır.



Şekil 2.11. İnce destek yapıları [20]

Ayrıca QuickCast olarak adlandırılan destek yapısı oluşturma yönteminde ise imalat sırasında parça içinde boşluklar bırakılır ve üretim sonrası sıvı fotopolimer açılacak deliklerden aşağı akıtılır. Üretim bittiğinde boşluklarda kalan sıvı fotopolimer açılan bir delikten dışarı akıtılır. Böylelikle hem daha az malzeme harcanmış olur, hem de hassas dökümde kullanılmaya elverişli bir model elde edilmiş olur. Önceleri üçgen ve kare şekiller kullanılmaktayken 2001 yılı itibariyle QuickCast 2.0 versiyonunda 3D Systems firması bal peteği şeklinde zayıflatılmış bir yapı kullanılmaktadır. Petek yapısının kolay parçalanabilmesi için

altıgenlerin yan yüzeyleri sadece köşelerinden, zayıf bir şekilde diğer yüzeylere tutturulmuştur. (Şekil 2.12)



Şekil 2.12. 3D Systems tarafından geliştirilen QuickCast sistemi [20]

SLA yönteminin temel avantajları ve dezavantajları aşağıda gösterildiği gibi sıralanabilir:

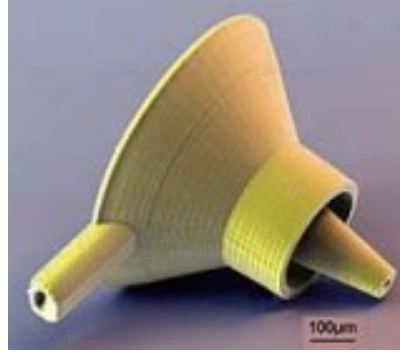
Avantajları

- Yüksek hassasiyet gerektiren parçalar yapılabilir.
- Yüksek yüzey kalitesi istenildiğinde kullanılacak en iyi yöntemdir.
- Geleneksel üretim yöntemleriyle tek bir proseste yapılamayacak parçaların yapılmasına olanak sağlar.
- SLA makine sürekli olarak çalışabilir
- Karmaşık şekilli parçalar üretilebilir.

Dezavantajları

- Prosesin karmaşık bir yapısı vardır.
- Üretim tamamlandıktan sonra ek işlemler gerekebilir.
- Malzeme özelliklerine göre kısıtlı bir uygulama alanı mevcuttur.
- Üretim için destek yapıları oluşturmak gerekir.

Ayrıca aşağıdaki 1 mikron katman kalınlığı ile üretilebilen mikro stereolitografi yöntemiyle medikal araçlar, iletişim donanımları, sensörler üretilebilir. Bu teknolojiye inşa sırasında farklı malzemeleri eklemek imkân dâhilindedir ve paralel imalat yapılabilirdiği için mikro parçaların veya mekanizmaların seri imalatı için uygundur. Alman MicroTec firması tarafından patentli bu yöntem çok küçük çaplı lazer kullanılarak üretim gerçekleştirilir.



Şekil 2.13. Mikro stereolitografi yöntemiyle üretilmiş bir parça [17]

3D Systems firmasının 2006 yılı itibariyle 5 çeşit SLA cihazı bulunmaktadır. Çizelge 2.3’ te bu 5 cihazın farklı parametreler açısından bir incelemesi verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere SLA-7000 cihazı minimum 0,0025 mm katman kalınlığı ile 508x506x584 mm boyutlarında parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca SLA-7000 cihazında bulunan süpürücü sadece parçanın boyutları kadar tarama yaptığından diğer makinelere göre daha hızlı işlem yapabilmektedir.

Çizelge 2.3. 3D Systems SLA cihazlarının farklı parametreler yönünden incelenmesi [21]

MODEL	PARAMETRE	SLA-5000	SLA-7000	Viper	Viper HA	Viper Pro
Lazer tipi		Katı Hal Nd:YVO4	Katı Hal Nd:YVO4	Katı Hal Nd:YVO4	Katı Hal Nd:YVO4	Katı Hal Nd:YVO4
Lazerin Gücü (mW)		216	800	100	100	1000
Kaplama Sistemi		Zephyr	Zephyr	Zephyr	Zephyr	Zephyr
Minimum Katman Kalınlığı (mm)		0,05	0,0025	0,02	0,05	0,05
Tarama Hızı (m/s)		5	2,54	N/A	5	3,5
Dikey Çözünürlük (mm)		0,00177	0,001	0,0025	0,0025	0,001
Tank Hacmi (l)		253,6	253,6	32,21	32,21	N/A
Maksimum Parça Ağırlığı (kg)		68,04	68	9,1	9,1	75
Maksimum Parça Boyutu (mm)		508x506x584	508x506x584	250x250x250	250x250x50,8	1500x750x500

2.1.1.1. SLA Sistemlerinde Kullanılan Fotopolimer Malzemeler

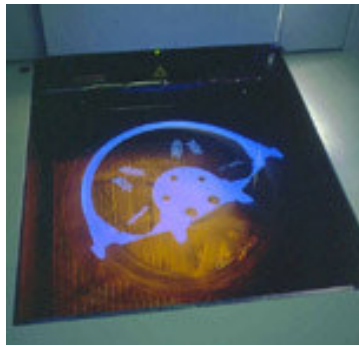
Stereolitografi yönteminde parçalar; bir lazer ışınına maruz kaldığında kürlenene ışığa duyarlı polimer akışkandan üretilirler. Günümüzde kullanılan fotopolimer malzemelerde gelişmeler devam etmektedir. Stereolitografi yönteminde genel olarak akrilat, epoksi veya vinitiler bazlı fotopolimerler kullanılmaktadır.

Daha sonra geliştirilmiş olan epoksi ve vinitiler bazlı fotopolimerler arasından epoksi bazlı olan fotopolimer malzemeler; stereolitografi yönteminde en çok kullanılan malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu reçine sistem, 3D Systems firması tarafından bir He-Cd lazerinden

325 nm dalga boyunda katılaştırılmak üzere SLA-250 cihazında kullanılmak için geliştirilmiştir.

Doğal fotopolimer malzeme Suriye'de çıkan bir tür ince asfalt veya katran kullanılarak yapılmış bir fotoğraf plakası üzerine saatlerce düşen bir görüntüyle elde edilmiştir Nicephore tarafından elde edilen bulgu daha sonra matbaacılıkta resim çoğaltmakta da kullanılmıştır. Bakır bir plaka üzerine ince bir tabaka Suriye katranı sürüp ardından üzerine yağa batırılarak şeffaf hale getirilmiş resimli kâğıt konularak güneş altında bekletiliyordu. Resmin şeffaf kısımları ışığı geçirerek ardadaki kaplamanın kür olmasını sağlıyordu. Kür işleminden sonra plaka yıkanıyor ve sadece resmin siyah kısımlarında plakanın üzeri katran kaplı kalıyordu. Ardından bu plaka asit içerisinde bekletiliyor ve kür olmuş Suriye katranı ile korunmayan tüm bölgeler biraz oyuluyordu. Böylece matbaa presinde kullanılabilecek uzun ömürlü bir baskı plakası elde edilmiş oluyordu. 1960' ların sonlarına doğru UV ışınları ile kürlenebilen ilk fotopolimer malzemeler, solvent bazlı kaplamaların oluşturduğu hava kirliliğini azaltmak için geliştirilmiştir. [16, 22]

Fotopolimerizasyon esnasında polimer moleküllerinin tekrardan sıvı içinde monomer olarak ayrışmayacak şekilde çapraz bağlanması önemlidir. Aynı zamanda işlemten sonra ki muhtelif kaplama işlerinde oluşabilecek kuvvetlere de dayanmalıdır. Serbest radikal fotopolimerizasyonundan ayrı bir de akrilat bazlı katyonik polimerizasyon vardır. Katyonik reçineler, daha iyi fiziksel ve mekanik özellikler sağlandığından prototip malzemesi olarak tercih sebebi olabilmektedir. [15]



Şekil 2.14. Kızılötesi dalga boyundaki lazer ışığı normalde çıplak gözle görülememesine rağmen fotopolimer reçine yüzeyine çarpınca görünür mavi bir ışıma ortaya çıkar. [20]

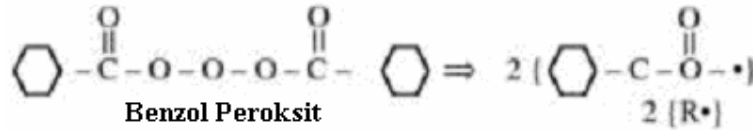
Hızlı prototipleme teknolojilerinde kullanılan polimer malzemeler iki gruba ayrılabilir:

- Fotopolimer malzemeler gibi **reaktif polimerler**
- Toz bazlı sistemler için kullanılan **reaktif olmayan polimerler**

Fotopolimerizasyon; kimyasal değişimi elde etmek için ışık kullanılarak yapılan bir fotokimyasal prostir. Stereolitografi yönteminde kullanılan polimerlerde serbest-radikal polimerizasyon ve katyonik polimerizasyon meydana gelmektedir.

Serbest-radikal polimerizasyon

Özellikle akrilat bazlı fotopolimer malzemelerde oluşur. İlk olarak; benzol peroksit gibi fotoinitiator iki reaktif konumla (R·) serbest radikallere şekil vermek için lazer ısısı altında Şekil 2.15'teki gibi ayrışır:

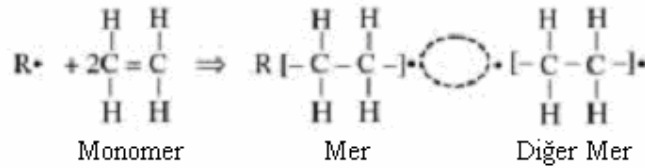


Şekil 2.15. Serbest-radikal polimerizasyon [22]

Bundan sonra sadelik ve devamlılık için monomerin etilen olduğu kabul edilirse; R·, etilen polimerindeki C atomlarından birini kendine çeker ve ikili bağdan tek bağa dönüşür. Bu; merdeki diğer karbon atomlarının reaktif konuma transfer olmasına sebep olur. Bu reaktif adım zincir başlangıcını işaret eder.

Üçüncü olarak, Şekil 2.16' da görüldüğü gibi mer; başka bir mer ile bağlanır. Bundan sonra, makro moleküllerin şekillenmesine kadar bir zincir reaksiyonu devam edecektir. Bu son adım zincir yayılması olarak tanımlanır. Zincirler 3 yolla sonlandırılır:

- Büyüyen iki zincirin aktif sonları birleşmesi
- Bir zincirin aktif sonunun diğer bir radikalle bağlanması
- Zincirin, ikinci bir zincirdeki H atomunu kaldırması.



Katyonik polimerizasyon

Akrilat Bazlı Fotopolimerler

piyasaya sürülerek ortadan kaldırılmıştır. Vinileter bazlı fotopolimerlerin viskoziteleri düşük olduğundan temizlenmeleri çok kolay olmaktadır. Ayrıca bu malzemelerin büzülme oranları çok düşüktür. Vinileter esaslı fotopolimerlerin özellikleri Çizelge 2.4’ te verilmiştir. [23]

Çizelge 2.4. Viniteler bazlı fotopolimer reçinelerin fiziksel özellikleri

İsim	Foto hız	Büzülme Faktörü (%)	Penetrasyon Derinliği (mm)	Viskozite (cP)
Exactomer 2201	1	<1	0,18	205
Exactomer 2202 SF	2,9	<3	0,17	230

Epoksi Bazlı Fotopolimerler

SLA–190 ve SLA–250 sistemlerinde 325 nm dalga boylarında He-Cd lazerle katılaştırılarak kullanılan ilk epoksi bazlı fotopolimerler 3D Systems firması tarafından 1993 yılında geliştirilmiştir. Epoksi esaslı fotopolimer hacimsel çekme, efektif lineer çekme ve büzülme olaylarına göre daha iyi özelliklere sahip olmaktadır. 3D Systems firmasının ürettiği epoksi bazlı malzemeler ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.5’ te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.6’ da DSM Somos firmasının ürettiği bazı epoksi fotopolimerlerin fiziksel özellikleri gösterilmektedir. Stereolitografi prototiplerde epoksi bazlı malzeme kullanımı ile bazı olumlu iyileştirmeler yapılmış olmasına rağmen yine de fonksiyonel testlere uygun prototiplerde olması gereken özellikler sağlanamamaktadır. Bu nedenle bazı ek işlemler yapılarak istenen özelliklere uygun parçalar elde edilebilmektedir.

Çizelge 2.5. 3D Systems firmasının ürettiği epoksi bazlı fotopolimerler [21]

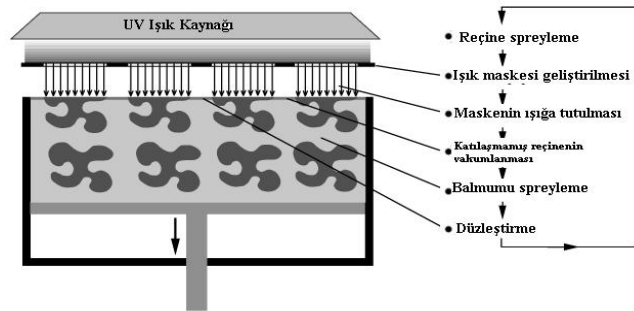
İsim	Görünüm	Yoğunluk (g/cm ³) (25°C)	Viskozite (cPs) (30°C)	Penetrasyon Derinliği (mil)	Kritik Şiddet (mJ/cm ²)
Accura 60	Şeffaf	1,13	150–180	6,3	7,6
Accura 50	Opak gri	1,15	600	4,5	9
Accura 45 HC	Kül rengi	1,14	475	5,1	7,4
Accura 25	Beyaz	1,14	250	4,2	10,5
Accura Bluestone	Opak mavi	1,7	1200–1800	4,1	6,9
Accura Amethyst	Mor	1,1	350	3,7	14,4
Accura SI 40	Kül rengi	1,1	485	6,8	21,7
Accura SI 10	Kül rengi	1,1	485	6,3	13,8
accuDur Nd	Kül rengi	1,1	485	5	13,2

Çizelge 2.6. DSM Somos firmasının ürettiği epoksi bazlı fotopolimerler [24]

	Görünüm	Yoğunluk (g/cm ³) (25 °C)	Viskozite (cPs) (30 °C)	Penetrasyon Derinliği (mil)	Kritik Şiddet (mJ/cm ²)
Somos 7100	Şeffaf kül rengi	1,13	700	5,6	10
Somos 8100	Şeffaf kül rengi	1,11	600	0,157	7,2
Somos 9100	Şeffaf kül rengi	1,11	560	0,13	6,8
Somos 10100	Şeffaf	1,12	130	0,14	8,1
Somos 11110	Şeffaf	1,12	92	0,14	11,5
Somos 12110	Kırmızı	1,15	410	0,14	12,2
Somos 14120	Opak beyaz	1,1	240	0,159	13
Somos 15120	Opak gri	1,33	570	0,132	16,3
ULM 17220	Siyah	1,07	3400	0,13	3,69
Protool 20 L	Opak bej	1,6	2500	0,15	12,5
Nanotool	Beyaz	1,65	2,5	0,11	8,3

2.1.2. Katı Tabaka Kurutma (SGC)

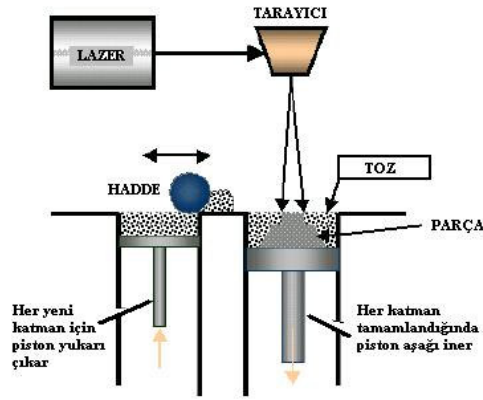
İlk olarak Cubital firması tarafından geliştirilen bu yöntem, SLA yöntemiyle benzer taraflar taşımaktadır. Parça eksenlerinin tanımlanmasından sonra tabaka kalınlığı belirlenir. Maske sıvı fotopolimer maskesinin uniform bir katmanına konumlanır ve sonra yoğun bir UV ışını katmanın üzerinden geçerek malzemeyi katılaştırılır. Katılaşmamış fotopolimer bir vakum sistemiyle alınarak düşük ergime noktasına sahip, suda eriyebilen bir mumla yer değiştirir. Parça, tabaka kalınlığını daha önceden tanımlanan değere indiren bir freze takımının altına geçer katmanın üzeri düzeltilir. Parça tamamlandıktan sonra mum sıcak hava veya suyla ertitilerek alınır. [25]



Şekil 2.18. Katı Tabaka Kurutma prosesi. [25]

2.1.3. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

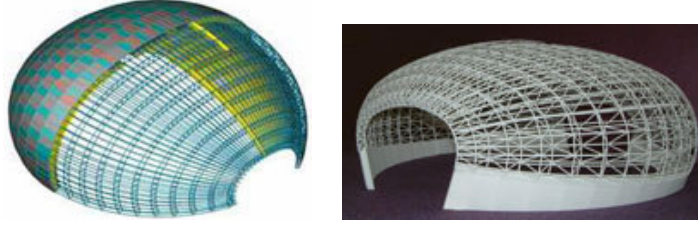
1989 yılında patenti alınan bu yöntem; naylon, elastomer, metal, seramik tozları veya bunlardan oluşturulan kompozit malzemelerle üretilen parçanın seçilen bölgelerinin bir CO₂ lazer ışını kullanılarak kısmen ısıtılarak veya sinterlenerek birbirlerine kaynaşması temeline dayanır. Bu işlem tüm proses bitene dek tekrarlanır. İşlem tamamlandığında parça, toz malzeme içerisinde gömülü durumdadır ve buradan çıkarılması gerekmektedir. Yöntemde her katman kalınlığı aynıdır ve sadece arakesit toz malzeme üzerine yansıtılır. [25,26]



Şekil 2.19. SLS prosesinin şematik yapısı [26]

Parça işleme bölümü asal gazdan temizlenir ve ısıtılarak tozun üstteki tabakalarının, malzeme erime sıcaklığına yakın sıcaklıklara getirilir. Ortamın ısınması, tozu erime sıcaklığına getirmek için harcanan ilave lazer enerjisini düşürür. Ayrıca imalat sırasında tabakaların çekmesi dolayısıyla çarpılmayı engeller.

SLS yöntemiyle de SLA yöntemiyle üretilen parçalara benzer toleranslarda ve detaylarda parçalar üretilir. SLS prototipleme yönteminin birincil faydası, malzemelerin dayanıklı olmasıdır. SLS prosesi, hızlı prototipleme endüstrisinde kullanılabilir geniş çapta mühendislik malzemelerine sahiptir. Günümüzde de birçok malzeme hala geliştirilmekte olsa da şu an itibarıyla son kullanım için hazır hale gelememişlerdir. [27]



Şekil 2.20. Bir parçanın CAD modeli ve SLS yöntemiyle üretilmiş prototip. [28]

2.1.4. FDM (Ergimiş Malzeme Yığma)

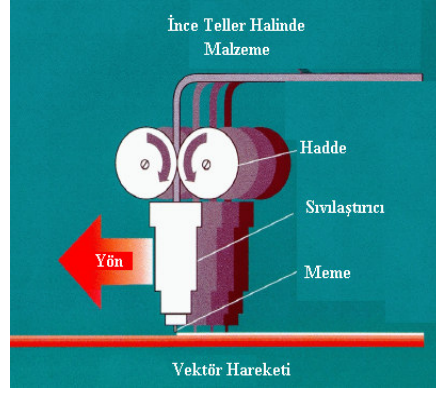
Bu yöntemde, termoplastik malzeme ince uçlu (yaklaşık 2 mm çapında) bir memeden, tıpkı pasta yapılır gibi yüzeye sıkılır. Bu malzeme ince teller halinde memeye ulaşır ve burada ısıyla katılma noktasının biraz üzerine çıkılarak erimesi sağlanır.



Şekil 2.21. FDM yöntemiyle hassas döküm mumu kullanılarak üretilmiş ince cidarlı bir şişe.

Böyle bir şişenin talaşlı imalatla tek parça halinde imal edilmesi imkânsızdır [17]

Her katman oluşturulduktan sonra seçilen katman kalınlığı kadar aşağı inen platform; bir sonraki katmanın inşasına izin verir. Platform düşük bir sıcaklıkta tutulduğundan termoplastik malzeme kolayca sertleşir.



Şekil 2.22. FDM yönteminin şematik olarak prensibi. [17]

Bu yöntemde, hassas döküm mumu ve polyamidin yanı sıra ABS gibi erime sıcaklığı yüksek mühendislik plastikleri de rahatlıkla inşa malzemesi olarak kullanılabilir. [17]



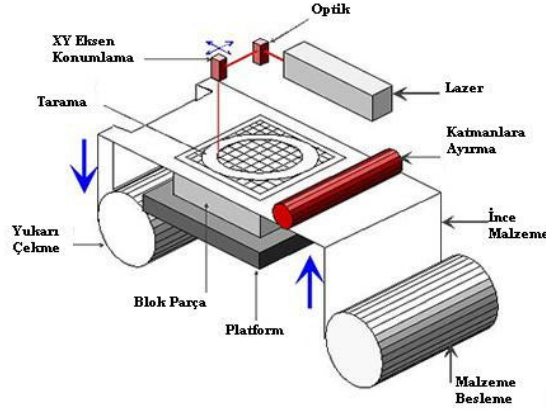
Şekil 2.23. FDM teknolojisiyle üretilen seramik parçalar [17]

FDM yönteminde parça kalitesi; malzemeye, bu malzemenin yığılma hızına ve malzemenin akış kontrolüne bağlıdır. FDM teknolojisinin üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük yatırım maliyeti
- Modellerin kısa zamanda ve hızlıca yapılabilmesi,
- Güvenli olarak ve hiçbir zarar oluşturmayacak şekilde çalışma imkânı vermesi
- Son ısıtmanın yapılmaması
- İşlenebilir mum, hassas döküm mumu ve naylon benzeri plastik malzemelerden seçim yapabilme olanağı.

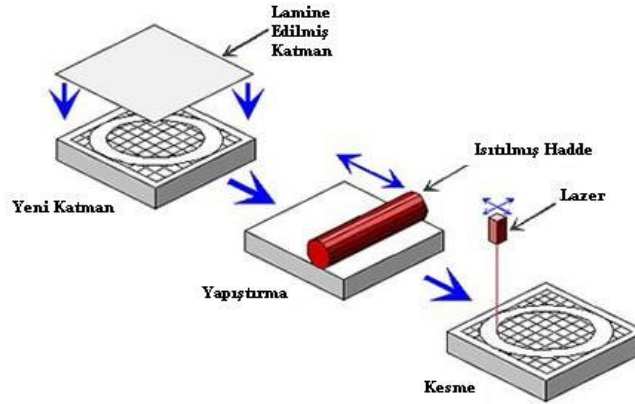
2.1.5. LOM (Tabakalı Nesne Üretimi)

Bu yöntem Helisys firması tarafından geliştirilmiş olup; yapışkan kaplı ince malzeme katmanlarının birbirlerine yapışarak bir prototipi şekillendirmesi temeline dayanır. Lazer ışını dilimlenmiş CAD verisindeki ince malzemenin çevresini kesmeyi kontrol etmek için kullanılır. [17]



Şekil 2.24. LOM sisteminin şematik gösterimi. [29]

Kesme işlemi tamamlandıktan sonra ısıtıcı silindirler devreye girerek yapışkanlık yardımıyla katmanları birbirine bağlar. Her katmanın kesiminden sonra platform kendi düşey eksenine göre aşağıya düşer ve diğer katmanın kesilmesi için yeni malzeme ileri beslenir.



Şekil 2.25. LOM yönteminin işlem yapısı. [29]

Parçanın üretimi tamamlandıktan sonra; son işlemler uygulanarak; temizleme vb. işlemler yapılır. İnce malzemelerden oluşmaları sebebiyle nemden korumak amacıyla koruyucu kaplama malzemeleriyle kaplama yapılır.

LOM yönteminde, blok parçadan artık kalan malzemenin temizlenmesi bir problem oluşturmaktadır. Yöntemdeki bir diğer problem ise artık malzemelerin parça içinde oyuklar oluşturmalarıdır. Parça içindeki artık malzemeler olduğu sürece, oyuklanmış bölgelere sahip parçaların oluşmasına engel olunamayacaktır. [29,30]



Şekil 2.26. LOM yöntemiyle üretilmiş bir dişli kutusu [16]

Bu tür dezavantajlarına rağmen LOM yöntemi, düşük maliyet ve kısa süreli üretim zamanları sağlaması sebebiyle piyasada sık karşımıza çıkan bir hızlı prototipleme yöntemidir. Ayrıca bu yöntemle parçanın CAD verisinden başka hiçbir şeye ihtiyaç duyulmadan prototipleme yapılabilmektedir.

2.1.6. Ink-Jet Printing

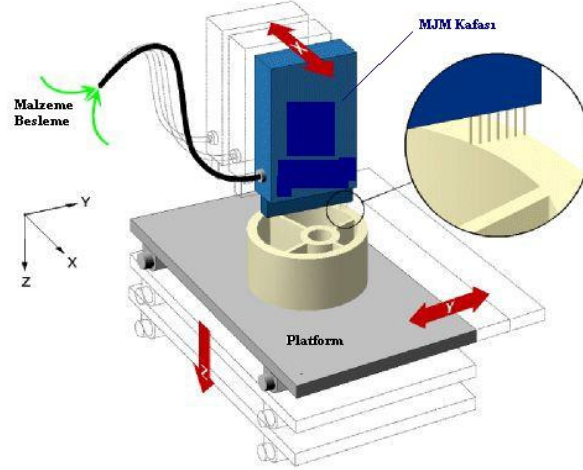
Günümüzde artık hızlı prototipleme teknolojilerinden bazıları; kullanımı basit, yer kaplamayan, sessiz ve hızlı teknolojilere dönüşmüşlerdir. Bunlarla hem üretilen parçalarda hem de üretim yapılan prototip makinesinde maliyet düşüktür. Prototipin, tasarımın ara aşamalarındaki kontrollerde yüksek hassasiyette olması gerekmediği durumlarda, “iş istasyonları” sayesinde elde edilebilir. [29]



Şekil 2.27. MIT ‘nin geliştirdiği 3 boyutlu baskı tekniği [31]

Şekil 2.27’ den de görüleceği üzere Ink Jet teknolojisini ilk olarak MIT – Soligen başlatmıştır. Bu teknikte, yapışkan toz halindeki malzeme istenilen bölgelere yığılarak baskı gerçekleştirilir. Şekil 2.27’ de açık gri renk ile gösterilen bölgeler üretime destek amacıyla kullanılırlar. Her katmanın üretimi ve seviyelenmesi bittikten sonra platform aşağı iner ve diğer katmanın üretimi başlar. Parçanın üretimi bitene kadar bu işlem devam eder.

3D Systems tarafından geliştirilen bu teknikte, prototip; termopolimer bir malzeme kullanılarak 3 boyutta hareket edebilen bir “multi jet modelleme” (MJM) kafası kullanan yeni bir proses ile üretilir. Baskı kafası çoklu hızlar ile modeli katman katman oluşturur. Şekil 2.28’ de MJM görülmektedir.

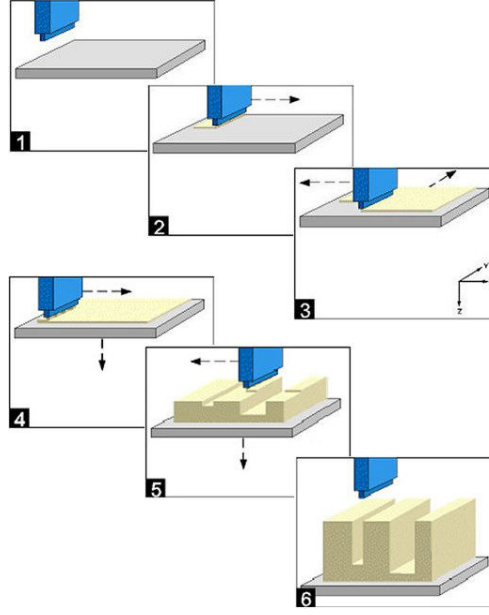


Şekil 2.28. MJM’ nin yapısı. [29]

3D Printer’ ın malzeme yığma prosesi bir yazıcıyla benzer özellikler taşımaktadır ve Şekil 2.29’ da gösterilmektedir: [29]

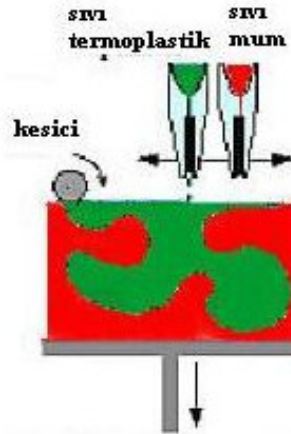
Yöntemle, prototipler çok kısa sürede, özel bir eğitim gerekmeden kısa sürede imal edilebilir. Ayrıca, çok farklı ve karmaşık tipte parçaların üretimine olanak sağlar. Masaüstünde kullanılabilen bu küçük cihaz ile mükemmel yüzey kalitesi elde edilebilmektedir.

Fakat üretilen modeller, zayıf olmakta ve kolayca zarar görebilmekte ve/veya çarpılabilmektedir. Bu sebepten dolayı parçalara mum vb. katılarak son ürünlerdeki dayanım artırılabilir ve ana malzemeye katılacak boyalar ile de oluşan prototipin istenilen renkte olması sağlanabilmektedir. [29]



Şekil 2.29. 3D Printer' ın çalışma yöntemi [29]

Ink Jet Printing yönteminin kullanımda olan bir diğer tekniği olan Solid Scape tarafından geliştirilmiş ve iki adet ink-jet yazıcı kafası benzeri araçlarla malzeme yığılması temeline dayanır. Bu işlem bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilir. Şekil 2.30' dan da görülebileceği üzere yeşil ile gösterilen memeden plastik malzeme, kırmızı ile gösterilenden ise mumu püskürtülmektedir. Mum malzemesi işleme destek veren konumdadır ve prototip oluşturulduktan sonra mineral yağ banyosunda yaklaşık 10 dakika bekletilerek ayrıştırılır. [17,31]

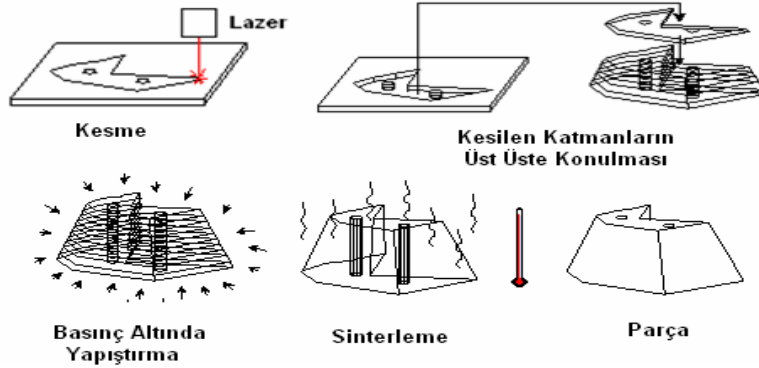


Şekil 2.30. 3D Plotting sisteminin çalışma prensibi [17]

Ink Jet yönteminin bir diğeri ise yaklaşık 10 yıl önce iflas eden BPM firması tarafından geliştirilmiştir fakat günümüzde artık kullanım alanı bulamamaktadır.

2.1.7. Kesip Yapıştırma Yöntemi

Bu teknikte, önce tabakalar çeperlerinden kesilir ve sonra bir önceki katmana yapıştırılır. Şekil 2.31’ de görülen CAMLEM firmasının geliştirdiği teknolojiye, oluşturulacak parçanın katmanları bir lazer vasıtasıyla kesilir ve kesilen bu katmanlar üst üste konulur. Laminasyon adı verilen işleme göre bu katmanlara sıcaklık altında basınç uygulanır ve bu işlemten sonra bütünlük sağlamak amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulur. [32]



Şekil 2.31. CAM-LEM prosesi [32]

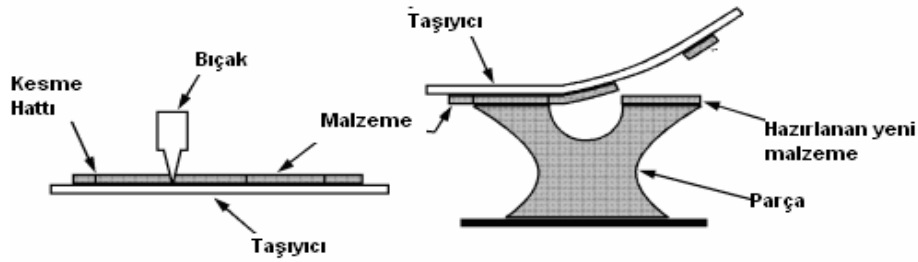
CAM-LEM yöntemiyle, dayanıklı seramik veya metal parçaların üretimi gerçekleştirilebilir. Ayrıca bu yöntemle farklı malzeme tiplerinin tek bir yapıda birleştirilmesi sağlanabilir. [32]



Şekil 2.32. CAM-LEM yöntemiyle üretilmiş bir parça [32]

Ennex firması tarafından geliştirilen Offset-Fabbing yönteminde ise, bir bıçak kullanılarak platform üzerine konulan malzeme kesilir. Kesilen parçalar taşıyıcı üzerine getirilerek yüzeye

yapıştırılması sağlanır. Daha sonra taşıyıcı kaldırılarak diğer katmanın yapıştırılması işlemine geçilir.



Şekil 2.33. Offset-Fabbing prosesinin şematik gösterimi [33]

Bu yöntemle çok hızlı olarak parçalar üretilebilirken, üretim güvenilir ve temiz bir ortamda yapılabilmektedir. Yöntemin uygulanması basit olup, uygulama alanı çok geniştir. [33]



Şekil 2.34. Offset – Fabbing yöntemiyle üretilen bir parça [33]

Kesip yapıştırma tekniklerinde, anlatılan teknolojilerin yanı sıra; kesmenin bilgisayar kontrolünde olduğu fakat yapıştırmanın elle yapıldığı yöntemler de mevcuttur.

2.2. Hızlı Prototipleme Sistemlerinin Faydaları

Hızlı prototipleme artık günümüzde bütün endüstride kullanım sahası bulmaktadır. Firmalar bu teknolojileri kullanarak zaman ve maliyet tasarrufu yapmayı amaç edinmişlerdir. Dünyada birçok kuruluş bu yöntemi bünyelerine alarak zamandan %60–90 arası kazanç sağlamışlardır. Ayrıca maliyet üzerinde de bir kazanç olduğu çok açıktır. Örneğin, parça tasarımındaki hatalar son karar verilmeden önce yapılırsa; hataların düzeltilmesi daha kolay olacak ve seri üretim yapılmadan tüm hataların önüne geçilebilecektir. Ayrıca parça tasarımlarındaki karmaşıklıkların her geçen arttığı tüm endüstrilerde hızlı prototipleme kullanarak en uygun parça en karmaşık halde kısa sürede elde edilebilir.

Her ne kadar hızlı prototipleme teknolojilerinin temel faydalarının zaman ve maliyet unsurları üzerine yoğunlaştığı gözükse de; pazar rekabetinde bir adım öne geçmek isteyen her firma mevcut ürünleri sürekli iyileştirmeli ve geliştirmelidir. Örneğin; alüminyum enjeksiyon ile üretilen bir parça 100 g ise; parça fonksiyonelliğini bozmadan ağırlığı arttırmak üretici firmanın ana hedefi olmalıdır. Ayrıca tüketimin her gün arttığı mevcut koşullarda; ürün çeşitliliği ihtiyacı da artacaktır. Buna örnek olarak; sürekli sayıları artan araba modelleri gösterilebilir.

Tüm bunlar; üretici firmaların kendilerine sağladığı ekonomik ve itibara dayalı faydalardır. Yukarıda sayılan zaman, maliyet ve rekabet faydalarının müşterilere de olumlu yansımaları olacaktır. Çünkü müşteri istekleri doğrultusundaki parçayı, kısa zamanda, daha düşük maliyetle ve güvenilir olarak alabilecektir.

2.3. Hızlı Prototipleme Teknolojilerinin Uygulamaları

Hızlı prototipleme teknolojileri; otomotiv, uzay, sağlık hizmetlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir ve mevcut kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Hızlı prototipleme teknolojilerinin kullanım alanlarını aşağıda sıralanmıştır:

Mühendislik alanında; gerek modelleme gerekse prototip ve hızlı kalıp imalatı konusunda kullanım alanı her geçen gün artmaktadır.

Bu konuda bir örnek verilecek olursa; optik gerilme analizinde kullanılan modellerin SLA yöntemiye elde edilen prototipler ile yapılması verilebilir.

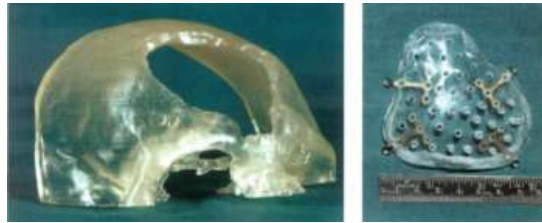
Fransız uçak motoru tasarım ve geliştirme grubu Snecma (Societe Nationale d'Etude et Construction de Moteurs d'Aviation) 1992 yılında fotopolimer reçine üreticisi Ciba-Geigy (yeni adıyla Vantico) ile SL epoksi reçinelerinin optik gerilim analizi tekniklerinde uygulanması için işbirliğine başlamışlardır.



Şekil 2.35. Snecma firmasının analiz için ürettiği türbin rotoru ve kanatları [17]

Şekil 2.35’ te görülen 70 cm çapındaki türbin rotor ve kanat modeli 9 parça halinde SLA yöntemi kullanılarak imal edilmiş ve her parçanın üretimi 30 saat sürmüştür. Parçaları birleştirip test için hazırlamak ise iki hafta sürmüştür. Toplam test projesi böylece 1 ayda tamamlanmıştır. 9 ay süren ve iki kat maliyeti olan eski teknikte ise öncelikle talaşlı imalatla modeller üretiliyor ve ardından silikon kalıplama ile şeffaf test parçaları üretiliyordu. Silikon kalıplama için modeller SLA yöntemi imal edilebilmesine karşın bu modellerin direkt olarak testlerde kullanılabiliyor olması daha hızlı ve ucuz bir çözüm imkânı sunmuştur. Direkt SLA yöntemi ile model imalatı özellikle silikon kalıplama ile bile tek parça halinde üretilmesi çok zor, karmaşık yapıları parçaların üretilmesi ve testi için çok uygundur. [17]

Medikal alanda bilgisayarlı tomografi verisine bağlı olarak model ve protez imalatı, dişçilik alanında protez ve implant yapımı, vücut içerisinde teşhise yardımcı olacak katı görüntüleme gibi konularda kullanım sahası vardır.



Şekil 2.36. Bir kafatasının modeli ve üretilen protez [34]

Kuyumculukta yeni tasarlanan karmaşık geometrili bilezik ve küpe gibi mücevherlerin modellerinin zahmetli el işçiliği gerektirmeden imalatı hızlı prototipleme teknolojileri kullanılarak yapılabilmektedir.



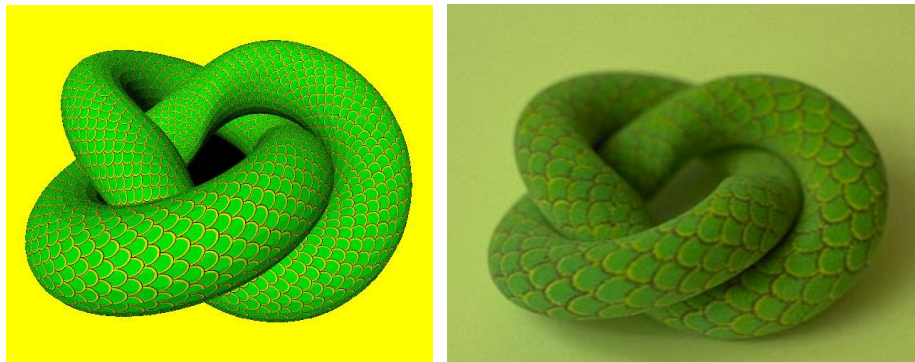
Şekil 2.37. 3D Printing ile üretilmiş bir yüzük tasarımı [17]

Mimarlık ve Sanat, Mimarlık alanında topografya modellemesinde kullanım sahası olup, yeryüzü şekillerinin 3 boyutlu modellemesi yapılabilmektedir. Ayrıca elle üretimi mümkün olmayan ve/veya çok zor olan sanat eserlerinin üretimi de yapılabilmektedir. Şekil 2.38’ de de görüldüğü gibi bir Amerika kıtasını 3 boyutlu olarak oluşturulan arazi şekli görülmektedir.



Şekil 2.38. 3 boyutlu oluşturulan harita [35]

Matematik, Fizik, Kimya Matematikte üç boyutlu yüzeyler artık katı modellenebileceği gibi, fizik ve kimyada, bilgisayarla tasarlanmış olan karmaşık molekül yapıları da oluşturulabilmektedir.



Şekil 2.39. Üretilen bir yılan modeli ve 3D Printer ile üretilmiş prototip [36]

2.3.1. Hızlı Prototipleme

Aslında adında da olduğu üzere; hızlı prototipleme teknolojilerinin en yaygın kullanım alanlarından biri hızlı prototiplemedir. Yukarıdaki konularda da sıkça geçtiği üzere prototip parçanın; tasarımcıya kazandırdığı en büyük fayda; tasarladığı ürünün eline somut örneğinin geçmesidir. Bu neticede parçanın kısa zamanda en uygun tasarımı sonuçlanacaktır.

2.3.2. Hızlı Kalıplama

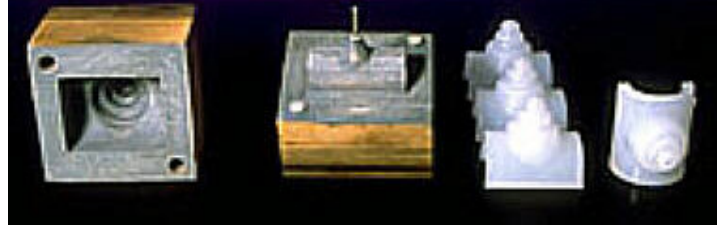
Hızlı Kalıplama sistemleri hem tasarım aşamasında hem de ötesinde ürün seri üretime girene kadar deneme üretimlerinde de başarı ile kullanılabilir. Dünyada da oldukça yeni olan bu teknolojiyi mevcut süreçlerine başarıyla dâhil edebilen firmalar rekabette önemli kazanımlara imza atmaktadırlar.

Kalıplar genellikle karmaşık geometrilere sahip olmalarına rağmen, ölçüsel olarak çok küçük toleranslarla çalışmayı gerektirir. Ek olarak, kalıpların dayanımlarının yüksek olması beklenir. Tüm bu gereklilikleri karşılamak için geleneksel yöntemlerle yapılan kalıp üretim teknolojileriyle (CNC işlemi, elektro erozyon vb.) çok ciddi zaman kaybı ve yüksek maliyet problemleri ortaya çıkmaktadır.

Aşağıda hızlı kalıp imalatının yoğun olarak kullanıldığı yöntemler sıralanmıştır:

- **Kum Kalıba Döküm:** Bilindiği gibi kum kalıba döküm yönteminde, dökülecek parçanın bir modeli yapılır, kuma bu model el ile veya otomatik olarak çıkarılır ve döküm gerçekleştirilir. Bu yöntem için geleneksel olarak kullanılan modeller; el ile kalıplamada ağaç modeller; otomatik kalıplamada ise metal modellerdir. Hızlı prototipleme yöntemlerinden LOM yöntemiyle yapılan modeller ile ağaç modellerin yerini almaktadır. Bu yöntemle yapılan modellemelerde LOM modeller; geometriye bağlı olarak 150–200 kalıpta kullanılabilir.

Bunların yanında Şekil 2.40' ta görülen LOM modeller uzun ömürlü olmasalar da plastik enjeksiyon kalıplarında da kullanılabilirler.



Şekil 2.40. LOM yöntemiyle elde edilen model ve üretilen plastik enjeksiyon parçası [17]

- **Hassas Döküm:** Hassas dökümde kullanılan modeller ısıtıldıklarında hiçbir şekilde genleşmemelidirler. Şayet bir genleşme meydana gelirse model etrafında oluşturulan kabuk kırılabilir. Bu nedenle hassas dökümde kullanılacak modellerin üretimi sırasında bu özeliğe dikkat etmek gerekir. Model olarak LOM yöntemiyle elde edilen prototipler sıcaklıkla boyutsal olarak değişime uğramadıklarından kullanılabilir. SLA prototiplerin termal genleşme özelliklerine karşın 3D Systems firmasının geliştirdiği yöntemle bu yöntemle elde edilen prototiplerde hassas döküm modelinde kullanılabilir. QuickCast ticari yöntemiyle anılan bu yöntem ile SLA model; ısıtıldığında içine doğru çökerek kabuğun zarar görmesini engellemektedir. Şekil 2.41’ de bir SLA model ve bu model kullanılarak hassas döküm yöntemiyle elde edilen parça görülmektedir. [17]



Şekil 2.41. Hassas dökümle üretilen bir jet motoru parçası (solda) ve bu parçanın kullanılan SLA modeli [17]

- **Vakum Döküm:** En eski ve basit hızlı kalıplama teknolojisinde, dökülecek parçanın hızlı prototipleme modeli, sıvı bir silikon veya oda sıcaklığında vulkanize kauçuğun bulunduğu bir tekneye asılır. Silikon/kauçuk sertleştiğinde, iki parçaya bölünür ve model ortaya çıkarılır. Oluşan silikon/kauçuk kalıpta poliüretan malzeme ile yaklaşık

25 döküm yapılabilir. Buradan da anlaşılacağı üzere, yöntemle elde edilen kalıp ömrü çok düşüktür.

Görüldüğü üzere hızlı prototipleme teknolojileri gerek doğrudan gerekse dolaylı olarak kalıplama teknolojisi olarak günümüzde çok sık kullanılmaktadır. Kum dökümde ağaç modellerin yerini alan prototip modeller, silikon kalıplama olarak adlandırılan yöntemde vakum döküm için modeli oluşturmada kullanılan prototipler, plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan epoksi modeller ve diğerleri; kalıplama teknolojisinde kullanım alanlarını her geçen gün arttırmaktadırlar.

2.3.3. Hızlı İmalat

Adından da anlaşılacağı gibi bu hızlı imalat; bilinen ve kullanılan üretim yöntemleri yerine hızlı prototipleme ürünü parçaların üretilmesi ve bunların yukarıda da anlatıldığı gibi herhangi bir prosesin yardımcı ve/veya ara elemanı olmak yerine direkt olarak son ürün olarak kullanılması demektir.

Tabi hızlı prototipleme teknolojisi kullanılarak üretilen bir parçanın günümüz şartlarında seri imalat için kullanılması; geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında yüksek maliyetleri sebebiyle çok sık karşımıza çıkmamaktadır.

Bu konuda bir örnek verilecek olursa, uzay mekiklerinde bulunan parçaların bazıları; uzaya gönderildiklerinden bir süre sonra bozulmaktadır ve mekiğin uzay yolculuğu sırasında bu parçaların değişmesi gerekmektedir. Bu sebeple uzay mekiklerinde; bahsedilen parçaların üretimi hızlı imalat ile yapılarak kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji sayesinde, hızlı prototip parçalarının seri üretimde kullanılmasının çok yakın bir sürede gerçekleşeceğini çok açıktır.

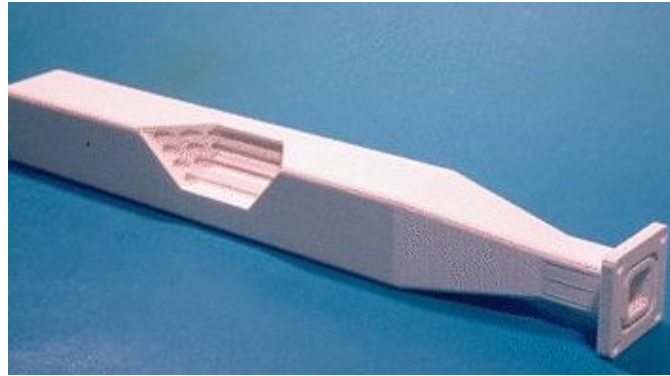
Hızlı imalat ile günümüzde çok olmasa bile mevcut uygulama örnekleri aşağıda verilmiştir:

Şekil 2.42’ de görülebileceği gibi Boeing firması; az sayıda üretilen bir havalandırma parçasını SLS yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 3D Systems – Renault işbirliği ile Formula 1 araçlarındaki bazı parçalar da SLA yöntemiyle üretilerek kullanılmıştır. [17]



Şekil 2.42. SLS yöntemiyle üretilen bir havalandırma parçası [17]

MIT ve bir Amerikan filtre firması olan Specific Surface firması ile ortak yürütülen bir çalışma neticesinde seramik filtreler 3D Printing yöntemiyle üretilmekte ve kullanıma sunulmaktadır. Bu yöntemle üretilen filtreler geleneksel üretim filtrelerle göre 10 kat daha verimli olup, kömürle çalışan elektrik santrallerinde artık gazlardan parçacıkları toplamak için kullanılmaktadır. [37]



Şekil 2.43. 3D Printing ile üretilmiş olan gözenekli seramik filtre [37]

Almanya'daki Microtec firmasının inşa ettiği, bir enjektör iğnesinin içine girebilecek kadar küçük motor ve mekanizmalar direkt imalat için güzel bir örnektir. Katmanlar inşa edilirken gerekli yerlere manyetik parçacıklar konulmakta ve böylece elektrik motoru imal edilmektedir. Motora bağlı diğer tüm mekanizmalar da bütünleşik olarak inşa edilmiştir. [17]



Şekil 2.44. Mictotec firmasının ürettiği elektrik motoru ve tüm mekanizması [17]

Görüldüğü üzere eğer yapılacak üretim küçük adetler içeriyorsa, hızlı imalat geleneksel üretim yöntemlerine göre ekonomik bir yöntem haline gelebilmektedir. Geleneksel yöntemlerle imalatı mümkün olmayan parçalar hızlı imalat ile daha kısa sürede üretilecektir.

2.4. Ülkemizde Uygulamaları

Ülkemizde hızlı prototipleme teknolojisinin kullanımı son yıllarda gözle görülür bir şekilde artmış ve kullanım alanını da hızla geliştirmeye başlamıştır. İlk olarak Arçelik A.Ş. firması 1993 yılında SLA cihazı olarak ülkemizdeki ilk hızlı prototip cihazını kullanmaya başlamıştır. Ayrıca çeşitli firmalar yurtdışındaki hızlı prototipleme cihazları üreticilerinin Türkiye temsilciliğini alıp satış ve teknik servis konusunda da destek vermeye başlamıştır. Şu anda yaklaşık 10 adet firmanın temsilciliği bulunurken, 15' e yakın firma ise çeşitli üreticilerin teknik desteğini sağlamaktadır.

Kullanım alanı her geçen gün genişlemiş olsa bile ülkemizde hızlı prototipleme cihazının en çok kullanıldığı sektörlerden biri de kuyumculuk sektörüdür. Ayrıca otomotiv, beyaz eşya, elektronik, haberleşme, sağlık, ambalaj sektörlerinde de birçok firma hızlı prototipleme yöntemlerini kullanmaktadır.

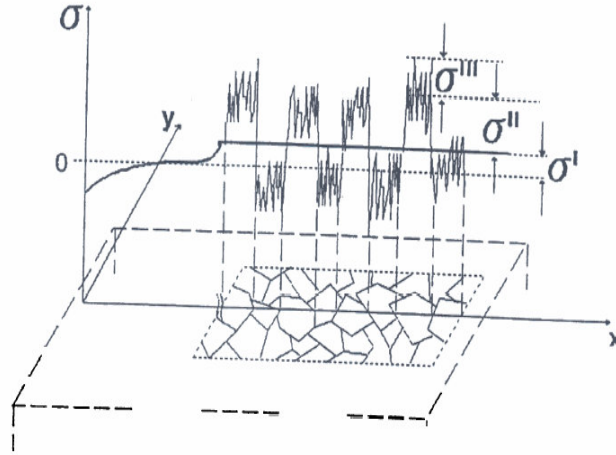
Ayrıca üniversitelerde de hızlı prototiplemenin kullanımı, eğitim ve Ar-Ge çalışmaları kapsamında hızla artmaktadır.

3. ARTIK GERİLMELER

3.1. Artık Gerilmelerin Sınıflandırılması

Artık gerilmeler; makro veya mikro gerilmeler olarak sınıflandırılabilirler.

Makro artık gerilmeler genellikle Birinci Çeşit artık gerilmeler olarak adlandırılırlar ve tanecik büyüklüğünden daha geniş olarak yapı içinde değişebilirler. Mikro artık gerilmeler ise İkinci ve Üçüncü Çeşit gerilmeler olarak sınıflandırılabilir. İkinci Çeşit gerilmeler tanecik büyüklüğü seviyesinde oluşurken Üçüncü Çeşit gerilmeler ise atomik seviyede meydana gelmektedirler.



Şekil 3.1. Artık gerilmelerin uzunluk derecelerine göre sınıflandırılması. [38]

3.1.1. Birinci Çeşit- Makroskobik Gerilmeler (σ^I)

Makroskobik gerilmeler bir parçanın tümünde plastik olarak bir deformasyon meydana gelmesi sonucu, bu oluşan deformasyonun eşit bölünmemesi durumunda oluşabilirler. Geleneksel imalat yöntemleri (talaşlı imalat, ısıtım işlem, kaplama vb.) sonucunda meydana gelebilirler. Makro gerilmelerin oluşma nedenleri aşağıda sıralanmıştır:

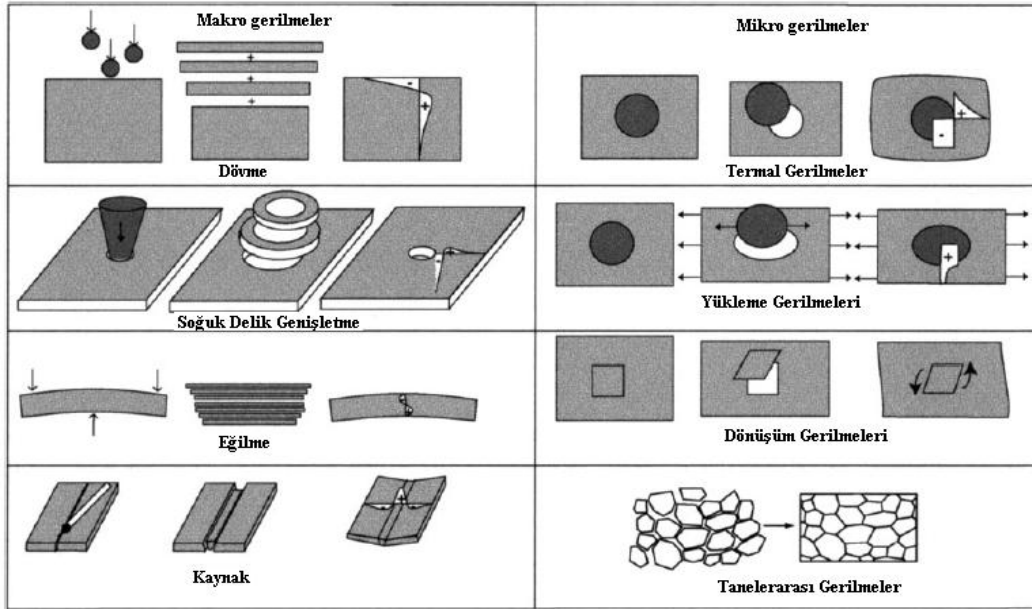
- Kristal yapıda meydana gelen çarpılmalar
- Dislokasyonlar
- Yapıya katılan dış atomlar [39]

Bir montaj sırasında parçaların birbirlerine uyuşmaması sebebiyle ya da bir yapıdaki farklı bölgeler arasında kimyasal, termal veya plastik olarak oluşan uyuşmazlıklardan meydana gelirler. [40]

3.1.2. İkinci Çeşit - Mikroskobik Gerilmeler (σ'')

İkinci çeşit gerilmeler mikroskobik artık gerilmeler adı verilir. Bu tip gerilmeler çoğunlukla yapı içinde farklı fazların oluşmasından meydana gelirler. Yapı içinde faz değişiklikleri, (ısıtma işlemi, hızlı soğutma vb.) homojen olmayan plastik deformasyonlar sonucu mikroskobik gerilmeler oluşurlar. Mikroskobik gerilmeler; sadece anizotropik yapıya sahip malzemelerde meydana gelirler. [41]

Şekil 3.2’ de makro ve mikro gerilmelerin farklı tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Makro – Mikro gerilmelerin değişik tipleri [41]

3.1.3. Üçüncü Çeşit – Mikroskobik Gerilmeler (σ''')

Üçüncü tip gerilmeler de mikroskobik gerilmelerin bir çeşididir. Genellikle bir tane içinde mevcut olup, dislokasyonlar veya kristalin hatalarının bulunması sebebiyle meydana gelmektedir. Üçüncü çeşit gerilmeler atomik seviyede oluşurlar. [41]

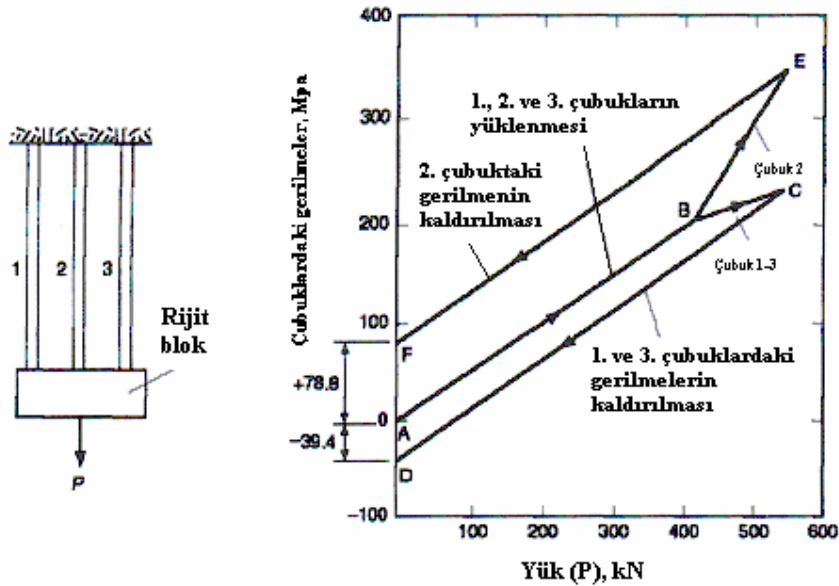
3.2. Artık Gerilmelerin Temel Kaynakları

Haddeleme, derin çekme, ekstrüzyon, dövme gibi şekil verme işlemlerinde; işleme, birleştirme endüstride sık kullanılan yöntemlerde, hızlı soğutma, ısıtma işlemi gibi termokimyasal işlemlerde yani genel anlamda üretim esnasında var olan proseslerde, artık gerilmeler aşağıdaki temel kaynakların birkaçı ve/veya tümünün kombinasyonları sebebiyle meydana gelirler:

- **Mekanik yüklemeler** veya **zorlamalar** sebebiyle ürünün farklı bölümlerinde homojen olmayan plastik deformasyon
- **Termal yüklemeler** sebebiyle homojen olmayan plastik deformasyon
- Katı hal **fazı dönüşümü** sırasında hacimsel değişimler ve dönüşümler
- Termal genleşme katsayısının uyumsuzluğu [6, 7]

3.2.1. Mekanik Yüklemelere Bağlı Artık Gerilmeler

Mekanik yüklemelere bağlı olarak artık gerilme oluşumu Şekil 3.3' teki örneğe bakılarak anlaşılabilir. En dıştaki iki çubuk aynı malzemeden yapılmış olup, ortadakinin akma gerilmesi ise bunlardan yüksektir. Çubukların üst bağlantıları sabittir ve hiçbir serbestlik derecesi yoktur. Alt bağlantı ise rijit fakat ağırlıksız bir blok ile sağlanmıştır. Tüm sistem Şekil 3.3' te görüldüğü gibi merkezde bir P yükü taşımaktadır.



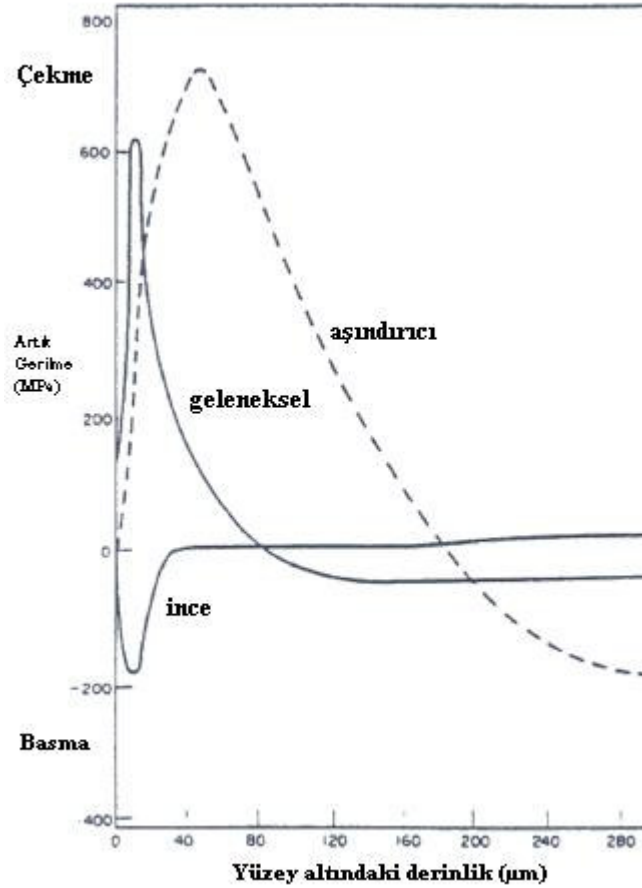
Şekil 3.3. Mekanik yüklemelerin sebep olduğu artık gerilmeler [7]

İki farklı yükleme şekli olduğunu düşünelim. İlk yükleme tipinde, P yükü aşamalı olarak 0 kN' dan 400 kN' a yükseltilmekte ve tekrar 0 kN' a indirilmektedir. P yükü 400 kN olduğunda her bir çubuğa ortalama 133 kN yük gelmekte ve bu akma gerilmesi değerini aşmamaktadır. Yüklemenin kaldırılması sonrasında her bir çubuk orijinal haline geri dönmekte ve hiçbir şekilde artık gerilme oluşmamaktadır.

İkinci yükleme tipinde ise P 0 kN' dan 534 kN' a yükseltilmektedir ve ilkindeki gibi 0 kN' a indirilmektedir. P yükü 400 kN' u aştığında dıştaki iki çubuk plastik olarak deformasyona uğramakta ve daha az yük paylaşmaya başlamaktadır. Dış iki çubuktaki gerilme ABCD yolunu izlerken ortadaki çubuk ABEF yolunu izlemektedir. P yükü 0 kN olduğunda çubuklardaki yüklerin artık 0 kN olmadığı görülmektedir. Bu nedenle ortadaki çubuk 78.8 MPa değerinde bir artık çekme gerilmesine, dış iki çubuk ise 39.4 MPa değerinde artık basma gerilmesine sahiptir.

Bu iki farklı yükleme örneğinden de görüleceği üzere parçalardaki homojen olmayan plastik deformasyon sonucu artık gerilmeler meydana gelmiştir. Benzer biçimde, malzeme içindeki plastik deformasyonun homojen olmadığı her parçada artık gerilme meydana gelecektir. [7]

Şekil 3.4 üretim proseslerinden taşlama işleminin 3 farklı tipi sonucu bir çelikte oluşturduğu artık gerilme dağılımını göstermektedir.



Şekil 3.4. 3 farklı taşlama işlemi sonucunda sertleştirilmiş bir çelikte oluşan gerilme dağılımı [38]

Şekil 3.4' ten de görüleceği üzere geleneksel ve yüksek aşındırıcı tip taşlama işlemi çekme gerilmeleri oluştururken; ince taşlama işlemi ise basma gerilmeleri oluşturmaktadır. [38]

3.2.2. Termal Kaynaklı Artık Gerilmeler

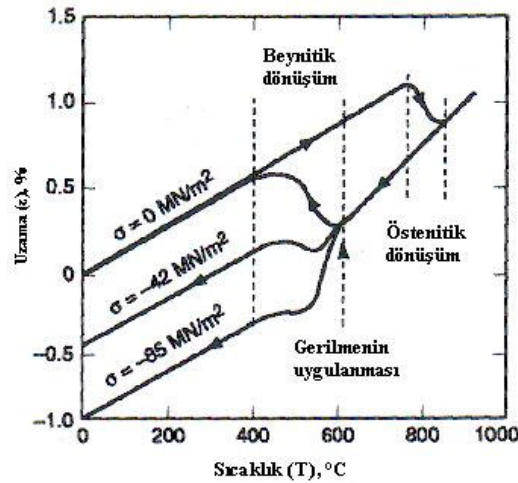
Termal gerilmelerden dolayı meydana gelen homojen olmayan plastik deformasyonlar sebebiyle oluşan artık gerilmeler Şekil 3.3.' teki sisteme bir çubuk sistemiyle açıklanabilir. Bu sistemde, eşit boyda ve kesit alanındaki karbon çubuklar bitiş yerlerinden rijit bloklara bağlanmışlardır. Ortadaki çubuk 593 °C' ye ısıtılıp oda sıcaklığına soğutulurken; dıştaki iki çubuk oda sıcaklığında tutulmaktadır. Çubuğun sıcaklığı yükseldiğinde, uyumluluk ve denge gereklilikleri sebebiyle orta çubukta bir basma gerilmesi, dış iki çubukta bunun yarısı kadar bir çekme gerilmesi meydana gelecektir. (Şekil 3.4)

Ortadaki çubuğun sıcaklığı çok yükselip akma sınırını geçtiğinde ve dıştaki iki çubuğun ise oda sıcaklığında kalıp akma gerilmesinin altında kalmaları; bu 3 çubuğun da oda sıcaklığına gelmeleri sonrasında artık gerilmelerin oluşacağını göstermektedir. [7]

Makroskobik seviyede, termal olarak oluşturulan artık gerilmeler çoğunlukla uniform olmayan ısınma - soğuma operasyonları sonucunda oluşurlar. Örneğin yukarıdaki 3 çubuk çalışmasındaki çubukların kompozit bir malzeme oluşturulacağı kabul edilirse, dış iki katmanın malzemesi aynı olduğunda bunların termal genişleme katsayıları eşit olacak fakat ortadakinden farklı olacaktır. [7, 38] Görüldüğü gibi termal şekilde birbirinden farklı bir genişlemeye sahip olacak bir malzeme, bu tip bir prosese tabi tutulduğunda olası problemler meydana gelecektir.

3.2.3. Metalürjik Kaynaklı Artık Gerilmeler

Isıl işlemi ve kaynak gibi prosesler sırasında, malzeme yapısında bir veya birden fazla faz dönüşümü meydana gelir. Bu tip gerilmeler; çökelme, faz değişimi gibi metalürjik kaynaklı reaksiyonlar ile ilişkili olarak hacimsel değişimler sebebiyle oluşabilirler. Örneğin çeliklerde bu tip hacimsel değişimler soğuma sırasındaki çekme normale göre farklılık göstermektedir. [7, 38] Şekil 3.5' e bakıldığında soğuma sırasındaki faz dönüşüm rejimi görülecektir, çok düşük bir gerilmenin varlığı, artık plastik gerilmelere neden olmaktadır. Yapıda bir arada bulunan hacimler arasındaki fark dış bir yükün altındayken zayıf bir fazda mikroskobik plastisite oluşturacaktır. [7]



Şekil 3.5. Dönüşüm plastisitesi [7]

3.3. Artık Gerilme Ölçüm Yöntemleri

Artık gerilme ölçüm yöntemleri temel olarak, ölçüm yönteminin çeşidine göre iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerdir. Bilindiği üzere artık gerilmelerin ölçülmesi ve tespiti, mühendislik alanında çok önemli bir konudur.

Yöntem seçimi; ölçüm yapılacak numuneye, ölçüm hassasiyetine, gerilme dağılımına göre değişmektedir. Çizelge 3.1. artık gerilme ölçümünde kullanılan temel yöntemlerin bazı parametreler arasındaki karşılaştırmasını vermektedir.

Artık gerilme hiçbir zaman, onu meydana getiren proses sırasında ölçülemez. Dolayısıyla artık gerilme ölçümü, ilgili üretim prosesi bittikten sonra ölçülebilir. [7]

Çizelge 3.1. Ölçüm yöntemlerinin bir karşılaştırması [38]

ÖLÇÜM YÖNTEMİ	PRATİK KONULAR								
	Temas Var/Yok?	Tahribatlı?	Lab. Tabanlı / Taşınabilir?	Ekipmanın Bulunabilirliği	Hız	Standart	Ekipman Maliyeti	Ölçüm Maliyeti	Uzmanlık Gereksinimi
Delik Delme	Var	Yarı	İkisi de	Çok geniş kullanım	Hızlı / Orta	ASTM E837-99	Düşük	€ 100 - 400	Düşük / Orta
X-Ray Difraksiyon	Yok	Hayır	İkisi de	Genellikle bulunur	Hızlı / Orta	Yok	Orta	€ 100 - 400	Orta
Nötron Difraksiyon	Yok	Hayır	Lab	Uzmanlık	Orta / Yavaş	Yok	Stratejik / Devlet olanağı	€ 50 - 3000	Düşük / Orta
Katman Kaldırma	Var	Evet	Lab	Genellikle bulunur	Orta	Yok	Düşük	€ 100 - 400	Düşük
Manyetik	Yok	Hayır	İkisi de	Genellikle bulunur	Çok Hızlı	Yok	Orta	Düşük	Düşük
Ultrasonik	Var	Hayır	İkisi de	Genellikle bulunur	Çok Hızlı	Yok	Orta	Düşük	Orta
Raman/Fluoresan	Yok	Hayır	İkisi de	Genellikle bulunur	Hızlı	Yok	Orta	Düşük	Düşük

Ayrıca, gerilme direkt olarak ölçülebilen bir büyüklük olmadığından; hesaplanabilmesi için başka bir büyüklüğün ölçülmesi gereklidir. Ölçülecek artık gerilmenin çeşidine bağlı olarak her ölçüm yöntemindeki örnekleme hacmi önem kazanmaktadır.

Çizelge 3.2. temel ölçüm yöntemlerinde kullanılabilecek malzeme özellikleri açısından bir karşılaştırmayı vermektedir.

Çizelge 3.2. Temel ölçüm yöntemlerinin malzeme özellikleri açısından karşılaştırılması [38]

ÖLÇÜM YÖNTEMİ	MALZEME					
	Malzeme Çeşidi	Kompozit?	Kristalin/ Amorf	Kaplama?	Yüzey Hazırlama?	Yüzey Durumu
Delik Delme	Metal Plastik Seramik	Evet	İkisi de	Evet	Işık absorbsiyon - strain gauge	Düz
X-Ray Difraksiyon	Metal Seramik	Evet	Kristalin	Evet	Önemli	Önemli
Nötron Difraksiyon	Metal Seramik	Evet	Kristalin	Hayır	Kritik Değil	Kritik Değil
Katman Kaldırma	Hepsi	Evet	Uygulanmaz	Evet	Kritik Değil	Kritik Değil
Manyetik	Ferromanyetik Malzemeler	Hayır	Kristalin	Hayır	Kritik Değil	Kritik Değil
Ultrasonik	Metal Seramik	Evet	Kristalin	Evet	Kritik Değil	Kritik Değil
Raman/Florasana	Seramik Polimer	Evet	İkisi de	Evet	Kritik Değil	Kritik Değil

3.3.1. Delik Delme Yöntemi

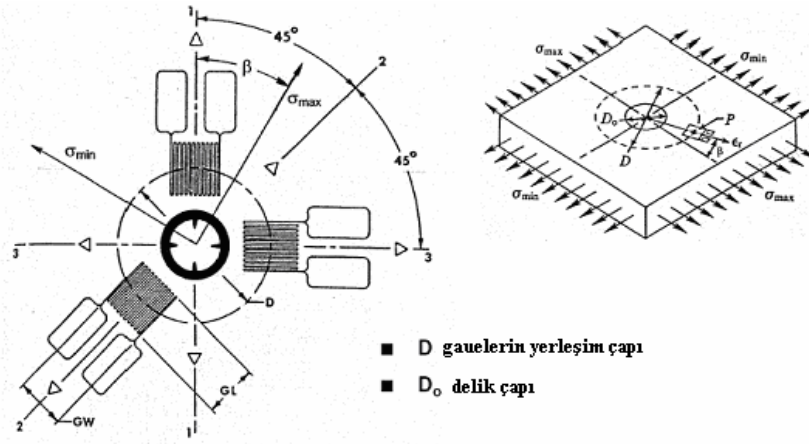
Bu yöntem artık gerilme ölçümlerinde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Delik delme yöntemi tahribatlı bir yöntem olsa da, büyük çaplı numuneler için bir bakıma tahribatsız olmaktadır. Çünkü delinen delik ve strain gaugeler küçüktür ve parçada çok yer kaplamazlar. Yöntemin prensibi, artık gerilme ölçümü yapılacak olan parçaya bir matkap yardımıyla bir delik delinmesi ve uzamaların görülmesi, hesaplamalar yardımıyla da gerilmelerin bulunması temeline dayanır. Şekil 3.6. tipik bir delik delme cihazını göstermektedir.



Şekil 3.6. Tipik bir delik delme cihazı [9]

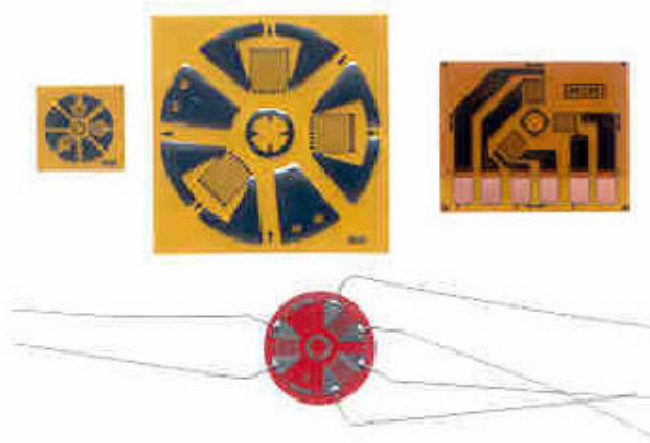
Pratikte delinecek olan delik, ortalama 1-4 mm çapında parçadaki uzamaların okunmasında yardımcı olacak olan özel strain gauge rozetlerinin ortasından delinir. Delik delinmesi neticesinde mevcut gerilme dağılımı delik etrafında oluşacak ve yüzeydeki gerinim sıfıra inecektir. Şekil 3.7' den görülebileceği üzere, strain gaugeler parçaya belirli açılar ile yerleştirilir. Delik delindikten sonra ölçülen her bir rozetten ölçülen gerinimler sayesinde 3.1 eşitliğine göre gerilme değeri hesaplanır. [35, 39]

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \frac{1}{C_1} \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{(1 - \mu C_2 / C_1)} \pm \frac{[(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3))^2]^{1/2}}{(1 + \mu C_2 / C_1)} \quad (3.1)$$



Şekil 3.7. Strain Gaugelerin yerleşimi [36]

Şekil 3.8' de kullanımda olan strain gaugeler gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Kullanımda olan strain-gaugeler [43]

Delik delme yöntemi; kullanımı basit, ucuz olmasına rağmen bazı kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Ölçülen uzama değerlerinin hassasiyeti, delik boyutlarındaki oluşabilecek hatalar, matkap ucunun plastik delik delme sırasında plastik deformasyona uğrama riski, yüzey pürüzlülüğü ve numune hazırlama gibi birçok parametre strain gaugelerden okunan uzamayı dolayısıyla hesaplanan gerilme değerini etkilemektedir.

Derin delik delme yöntemi temel olarak kalın kesitli ve karmaşık şekilli parçaların artık gerilme ölçümünde kullanılır.

Bilinen delik delme yöntemleriyle izotropik ve lineer elastik malzemelerin ölçümü yapılabilir. Gerilmeler derinliğe bağlı olarak fazla değişmemekle beraber ayrıca delik sınırlarındaki gerilme değişimleri de küçüktür. [43]

3.3.2. Katman Kaldırma Yöntemi

Katman kaldırma yönteminin prensibi, ince katmanların parça yüzeyinden sırayla kaldırılması sayesinde iç gerilme ve momentlerin dengelenmesine dayanır. Yüzeyden belirlenen miktarlardaki kaldırılan katmanlardan sonra, parçada oluşan eğrilik ölçülür ve formüller yardımıyla gerilme değerine ulaşılır. Temel amaç, yorulma kırılmasının ve uygulanmış yükün doğrultusuyla tanımlanmış olan temel gerilmelerin meydana geldiği düzlemdeki artık gerilmelerin mümkün olduğu kadar hassas ölçülmesidir. Artık gerilme çoğu kez çok aşırı olduğu için, mümkün olduğu kadar küçük olarak kaldırılan art arda gelen katmanların kalınlığı önem arz etmektedir [44, 45]

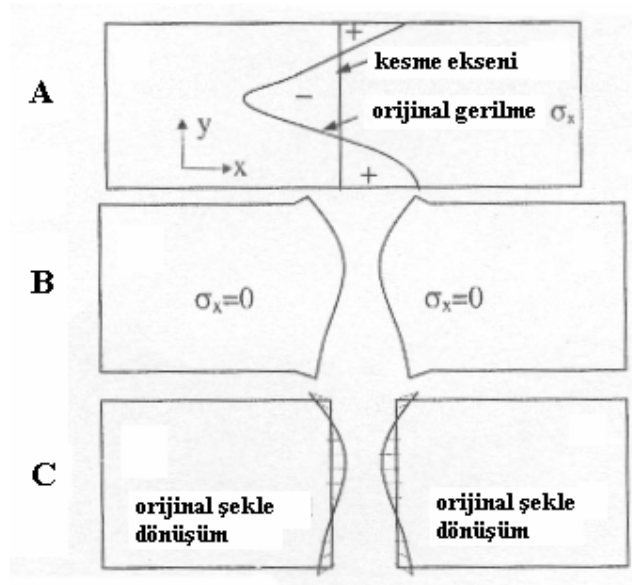
Katman kaldırma yönteminin uygulanmasındaki bazı temel zorluklar aşağıda sıralanmıştır:

- Gerilme boşalması mevcut gerilmenin tahmin edilenden daha az olmasına sebep olur.
- Katman kaldırma sırasında oluşabilecek gerilme değişimleri ölçüm sonucuna etki edebilir. Bu nedenledir ki, katman kaldırma işlemi eğer mekanik olarak yapılacaksa, ölçüm numunesine ek gerilmelerin eklenmemesi için; parçanın soğutulması sağlanmalı ve işleme çok düşük ilerleme ve yüksek devirle yapılmalıdır.
- Katman kaldırma işlemi yapıldıktan sonra yapılan ölçümlerin kesinliği de çok önemlidir. [46]

Katman kaldırma yöntemi ayrıntılı olarak 3.6 başlığı altında incelenmiştir.

Kesit alma yöntemleri deneysel olarak uygulanması zor, analiz etmesi karmaşık, hata yapma olasılığı yüksek olan uzaysal çözünürlüğü sınırlı olan yöntemlerdir. Tek, çift ve üç eksenli kalıcı gerilme durumlarını belirlemek için uygulanabilir. Yüzey gerilmelerini belirlemek için kullanılan yöntemler bileşenden malzeme parçalarının kesilerek çıkartılmasını içerir; kesip çıkarılan parçadaki gerinim değişiklikleri, kesme işleminden önce parçanın kesilip çıkarılacak kısmına yapıştırılmış strain gaugeler ya da ekstansometre yardımıyla ölçülebilir. [9, 45]

Kontur yöntemi temel olarak, artık gerilme ölçümü yapılacak numunenin ikiye bölünmesi, oluşan yeni kontur veya profilin her iki parça için ölçülmesidir. Kesme işleminden sonra, artık gerilmeler sebebiyle oluşan yer değiştirmelerin saptanması için profilin ölçülmesi yapılır. Ölçülen konturun tersi yüzeye yer değiştirme sınır şartı olarak uygulanır ve kesme ekseninin normali olarak orijinal artık gerilmeleri verir. [45]



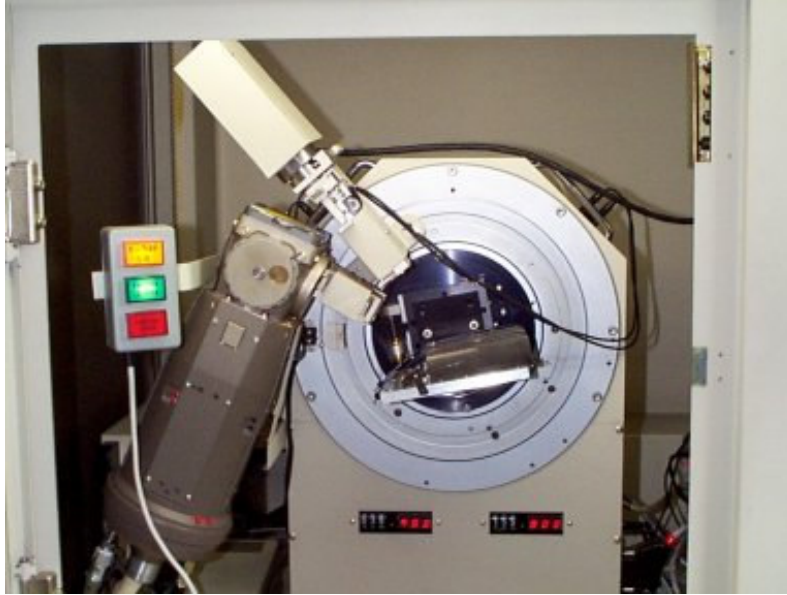
Şekil 3.9. Kontur yönteminin şematik gösterimi [9]

Şekil 3.9’ da gösterilen yönteme göre, A adımımda artık gerilme ölçümü yapılacak parça ikiye bölünür. B adımımda, her iki parça yüzeyinde de artık gerilmeler gevşer ve normal gerilme 0 olur. C adımımda ise parça orijinal pozisyonuna gelmeye zorlanır. [9]

3.3.3. X-Ray Kırınım Yöntemi

X-Ray Kırınım yöntemi ile artık gerilme ölçümü, tahribatsız ölçüm yöntemlerindendir ve günümüzde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Temel olarak artık gerilme ölçülecek olan malzemenin kristal yapısı içindeki atomik uzaklıkların ölçümüne dayalıdır. Yapıdaki atomik düzenin deformasyonu kafes eksenlerinin uzaklıklarında değişikliğe yol açabilir. Oluşan yeni uzaklık her benzer yönlendirilmiş eksende uygulanan gerilme ve kristal yapısına bağlı olarak aynı olacak ve bu sebeple de küçük bir strain gauge olarak davranacaktır. [38, 45, 47]

Ölçüm süresince artık gerilme ölçümü yapılacak parçaya X-Ray ışınları gönderilir ve bu ışınlar malzeme yüzeyine girerler. Kristal yapı bazı X-Ray ışınlarını bir detektöre göre X-Ray ışınlarının açısal olarak konumlarını saptamak için kırar ve bu açısal konumdaki bu ışınların yoğunluklarını kaydeder. Işın demetlerinin konumu gerilmenin saptanmasında yardımcı olur. (Şekil 3.10)



Şekil 3.10. X-Ray Cihazı [38]

Temel olarak ölçüm süresince artık gerilme ölçümü yapılacak numune yüksek seviyede C-Ray ışınlarına Bragg kanunlarına göre 3.2 eşitliğindeki şekilde maruz kalır:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.2)$$

Burada n tamsayı, λ X-Ray'in dalga boyu, d eksenler arası uzaklık ve θ ise X-Ray ışın demetinin geliş açısıdır. Yukarıda da anlatıldığı gibi cihazda bulunan detektör numune etrafında dolaşarak kırınım yapan ışınları kaydeder. Kayıtlar sonrası genellikle en yüksek olarak 2θ açıda oluşan ışın bandı kullanılarak malzemedeki uzamalar, ilk hale kıyaslanarak ölçülebilir. Gerilmeleri saptamak için çok çeşitli ölçüm yöntemleri mevcuttur. Bunlar;

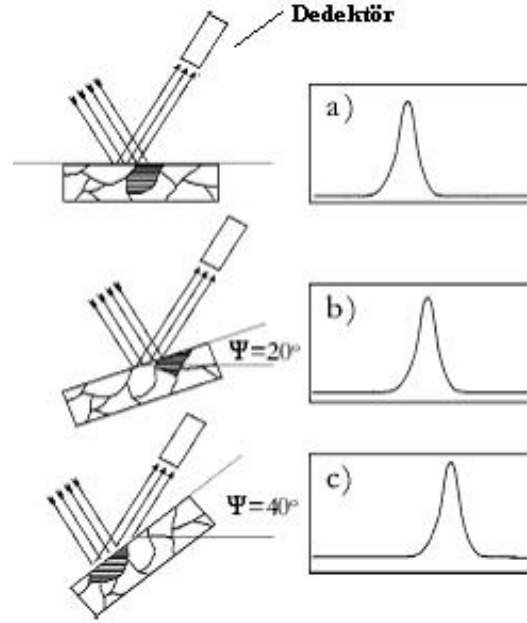
- İki kez maruz bırakma yöntemi
- Paralel Işın Demeti yöntemi
- $\sin^2 \psi$ yöntemi
- Kenar-eğimi yöntemi

Bunlar arasında en çok kullanılan yöntem $\sin^2 \psi$ yöntemidir. [38, 48]

$\sin^2 \psi$ yöntemi, çok kristale sahip malzemelerde artık gerilmelerin ölçümü için kesin bir yöntemdir. Şekil 3.11' de görüldüğü üzere ψ açısı ile dönen numune örnek gibi değişecektir. Bu değişimin büyüklüğü artık gerilmenin büyüklüğü ile ilgilidir. Eğer malzeme içersinde artık gerilme yoksa dönme de sıfır olacaktır. Artık gerilme ve ışınların dönmesi arasındaki bağıntı 3.3 eşitliği ile verilmiştir:

$$\sigma = \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2 \Psi} \frac{(d_i - d_0)}{d_0} \quad (3.3)$$

Burada E Young modülü, ν Poisson oranı ve ψ dönme açısıdır. d_i ise her dönme açısında ölçülen boşluklardır. Eğer parçada mevcut hiçbir shear uzaması yoksa d boşlukları doğrusal olarak $\sin^2 \psi$ açısı kadar değişecektir.



Şekil 3.11. ψ değerindeki değişim ile kırınımın dönmesi [46]

X-Ray kırınım yönteminin diğer artık gerilme ölçüm yöntemleri arasında çok kullanılmasının sebeplerinin en önemlisi yöntemin tahribatsız olmasıdır. Bunun yanı sıra tahribatlı yöntemler ile karşılaştırma yapıldığında daha net sonuçlara ulaşmayı sağlar, ölçümler tekrarlanabilir. Tüm bunlara rağmen, yöntem temel olarak laboratuvar şartlarında yapılmaya uygundur ve uygulama deneyimli kişilerce yapılmalıdır. Ayrıca diğer artık gerilme ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında, daha karmaşık, çok zaman harcanan, pahalı bir yöntem olduğu görülmektedir.

Senkrotron olarak bilinen yöntemde ise daha yoğun X-Ray ışınları kullanılır. Normal X-Ray yöntemine göre daha derinlere girebilir. Bu, 3 boyutlu olarak daha net sonuçlar vererek, milimetrik olarak uzamaların ölçülmesine olanak sağlar.

3.3.4. Nötron Kırınım Metodu

Tıpkı X-Ray yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de kristal yapıdaki eksenler arası uzaklıkların ölçülmesiyle gerilme değeri bulunmaktadır. Dikkatli olarak yapıldığında X-Ray yöntemine göre yarıdan fazla bir kesin sonuç sağlamaktadır.

Yöntem makroskobik olarak bir uzama alanının var olduğunu ve vektörel olarak ϵ_{ij} ile tanımlandığını kabul eder. Uzama vektörü; σ_{kl} gerilmesine makroskobik elastik vektörlerin S_{ijkl} bileşenleri vasıtasıyla aşağıdaki 3.4 eşitliği ile bağlıdır:

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3.4)$$

Burada önemli olan nokta i, j, k ve l $\in \{X, Y, Z\}$ olduğudur. Küre, elips gibi basit tane şekilleri için tane sınırlarında uzama ve gerilme eşleşmesine olanak sağlayan etki vektörü, t_{ijk} , eklendiğinde eşitlik 3.5 halini alır:

$$\epsilon_{ij} = (S_{ijkl} + t_{ijk}) \sigma_{kl} \quad (3.5)$$

Burada da i, j, k ve l $\in \{X, Y, Z\}$ 'dir. [49]

Nötron kaynağı olarak titreşimsiz durum kaynağı ve titreşim kaynağı kullanılmaktadır. İlkinde nötronlar öncelikle tek renkli olarak oluşturulur ve parça üzerinde farklı açılarda çarpması sağlanır. Titreşim kaynağında ise, tek renkli oluşturulan ışın parçaya gönderilir ve parçada kırılması sağlanan nötronlar analiz edilir. Titreşim kaynağı ile elde edilen nötronlar düşük yoğunluğa sahiptirler ve artık gerilme ölçümünde kullanılması için pek elverişli değildir. [50]

Nötron kırınım yöntemi de X-Ray yöntemiyle benzer sınırlamalara sahiptir. Yöntem laboratuvar şartlarında uzman kişilerce yapılmalıdır. Ayrıca diğer artık gerilme ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldıklarında, pahalı, uzun işlem süresine sahip ve karmaşık bir yöntemdir.

3.3.5. Manyetik Yöntem

Ferromanyetik özelliklere sahip olan malzemeler, manyetik olarak uzama kısılmaları sebebiyle iç gerilme durumuna karşı hassastırlar. Bu tür malzemelerde, manyetikleşme ve elastik uzama arasında bir bağlantı vardır. Buna örnek olarak çelik bir tel örneği verilebilir. Bir çelik tel parçasının uzaması, manyetikleşme yönünde olacaktır. Ters bir düşünceyle, çelik tel gerildiğinde, bu gerilme yönünde manyetikleşecektir. [9, 49]

Manyetik uzama kısılma vasıtasıyla her manyetik alan kendi manyetikleşmesi yönünde uzayacaktır. En düşük enerji seviyesinde manyetikleşme kristal yapısı yönünde yani manyetikleşmesi kolay bölgelerde dizilecektir.

Gerilme seviyesindeki her değişim, manyeto elastik enerjideki düşüşe öncülük edecek her kolay eksenlerin her biri boyunca sıralanan alanların sayısında bir değişime sebep olacaktır. Manyetik olarak artık gerilme ölçümünde dikkat edilmesi gereken nokta, ölçüm yapılacak malzemenin sertliği, tane büyüklüğü gibi ölçümü etkileyecek manyetik parametrelerinin değişkenliğini en aza indirilmesidir. Basma gerilmesi altında mıknatıslanmanın olması zordur, çünkü mıknatıslanma elastik enerjiyle artar, çekme gerilmesi altında mıknatıslanma daha kolay olur, çünkü mıknatıslanma elastik enerjiyle değişmez. [45, 49]

Manyetik yöntemle artık gerilme ölçümü çok kısa sürede ölçülebilir ve uygulanması çok basittir. Fakat isminden de anlaşılacağı üzere uygulama alanı malzemeye göre kısıtlıdır.

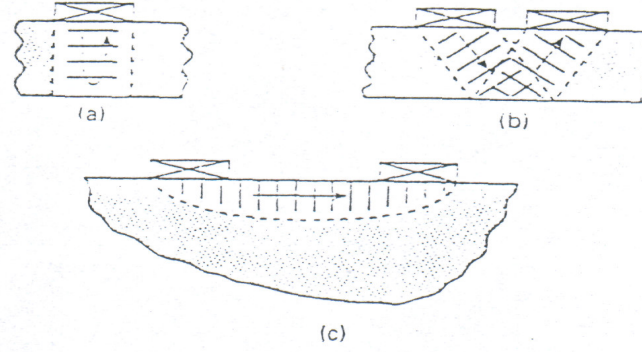
3.3.6. Ultrasonik Yöntem

Ultrasonik yöntemler ses üstü dalgaların hızlarındaki hassasiyeti bir parçadaki gerilmeyi incelemek için kullanılırlar. Malzemenin içerisindeki gerilmeler hakkında bilgiler elde etmeyi sağlar. Ultrasonik dalgaların hızlarındaki değişim bir malzemedeki mevcut gerilmenin büyüklüğü ve yönüne direk olarak etkide bulunmaktadır.

Gerilme ölçümü için kullanılan ultrasonik yöntemler,

$$V = V_0 + J\sigma \quad (3.6)$$

3.6. eşitliği ile tanımlanabilen dalga hızındaki değişim esasına dayanmaktadır. Burada V_0 gerilmesiz bir atomdaki dalga hızı, σ gerilme ve J ise akustoelastik sabit olarak bilinen bir parametredir. Şekil 3.12' de gösterildiği gibi değişik deneysel yapılandırmalar kullanılabilir.



Şekil 3.12. Akustoelastik ölçüm yapılandırmalarının şematik gösterimi [45]

Şekildeki her durumda verici transdüser dalgalar gönderir. Gönderilen bu dalgalar malzemenin bir bölgesi boyunca yayılır ve alıcı transdüser tarafından hissedilir. Eğer verici ve alıcı olarak aynı transdüser kullanılırsa (Şekil 3.12.a) teknik monostatik, farklı transdüserler kullanılırsa (Şekil 3.12b, c) bistatik olarak adlandırılır. [45]

Bu yöntem tıpkı manyetik yöntemler gibi kolay uygulanabilir, ucuz ve taşınabilir olup herhangi bir tehlike içermemektedir. Fakat malzeme yapısına bağlı olarak sınırlı uzaysal çözünürlük, ses dalgalarının hızlarındaki değişimin çok hassas olması gibi sınırlamaları da mevcuttur. [9, 50]

3.3.7. Raman Spektroskopisi Yöntemi

Raman etkisi ışık ile madde arasındaki etkileşimi içerir. Lazer ışınları atomların titreşmesine neden olan bir yapı oluştururlar. Raman olarak bilinen dağınık ışınların incelenmesiyle, numunenin fiziksel durumu ve kimyasal yapısı hakkında can alıcı bilgilere ulaşılır. Bu yöntem $1\ \mu\text{m}$ 'nin altında yüksek uzaysal çözünürlüğe sahiptir ve zararsız bir yöntemdir. Yüksek uzaysal çözünürlük optik mikroskop kullanılarak elde edilir. Yöntem temel olarak bir uzama ölçümü yöntemi olmasına rağmen, optik olarak saydam malzemelerde yüzey altındaki bilgiler elde edilebilmektedir. Raman spektrometresi yöntemi özellikle fiber kompozitler için çok kullanılmaktadır. Florasan spektrometresi de kullanılmasıyla yöntemin daha geniş bir kullanım alanı olmuştur. [38]

3.3.8. Uyma Yöntemi

Uyma yöntemi derinlikle değişime uğrayana artık gerilmelerin saptanmasında çok güçlü bir yöntemdir. İzotropik malzemelerin incelendiği birçok uygulamada bu yöntemin kullanılması uygundur geleneksel yöntemlere göre daha kesin sonuçlar verecektir. Yöntem farklı geometrilere sahip kaynak, ısıl işlem vb artık gerilme oluşturan parçalara uygulanabilir. İki bileşen içerir: İleri ve ters çözümler. İleri çözümde, gerinimler bilinen artık gerilme dağılımı ile numuneye artımlı olarak açılan bir slottan hesaplanır. Ters yöntemde ise ölçülen en iyi uzama değeri ile gerçekten eşleşen gerilme dağılımı hesaplanır. [51]

3.4. Artık Gerilme Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Artık gerilme ölçümleri kullanımda olan yöntemlerini incelediğimizde; kullanım alanı, tahribatlı-tahribatsız oluşu, maliyet, işlem süresi, uygulanabilen malzemeler ve boyutlar, ölçülebilen gerilme çeşidi, gerilme gradyeni ölçüm doğruluğu ve kısıtlamalar, kolay kullanım vb. başlıklar altında her yöntemin kendine göre avantajının yanı sıra bir dezavantajı da olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla yöntem seçimi yapılırken tüm ölçütler göz önüne alınıp en uygun yöntem seçilmelidir. Çizelge 3.4 ve 3.5 temel artık gerilme ölçüm yöntemlerinin fiziksel karakteristik ve avantaj – dezavantajları bakımından karşılaştırmalar sunmaktadır.

Çizelge 3.3. Artık gerilme ölçüm yöntemlerinde fiziksel karakteristiklerin karşılaştırılması
[38]

ÖLÇÜM YÖNTEMİ	FİZİKSEL KARAKTERİSTİKLER							
	Çözünürlük	Penetrasyon	Gerilme Çeşidi	Gerilme Durumu	Gerilme Gradyeni	Belirsizlik	Örnekleme Alanı/Hacim	Açıklama
Delik Delme	50-100 µm derinlik artma	=delik çapı	Makro	Tek eksenli Çift Eksenli	Evet- açıklaması zor	Derinlik ile değişir	1-2 mm çap 1-2 mm derinlik	
X-Ray Difraksiyon	20 µm derinlik 1 µm yanıl olarak	5 µm - Ti 5 µm - Al 1 mm katman kaldırma	Mikro Makro	Tek eksenli Çift Eksenli	Evet- katman kaldırma ile	Birçok nedenden dolayı sınırlı	0.1-1 mm ² 0.05-0.1 mm	1 mm çapındaki çelik için çözünürlük min 15 µm derinlik
Nötron Difraksiyon	500 µm	100 mm - Al 25 mm - Fe 4 mm - Ti	Mikro Makro	Tek eksenli Çift Eksenli Üç Eksenli	Evet	Kısmen Sınırlı	> 1 mm ³	
Katman Kaldırma	Malzemeye ve katman kaldırma yöntemine bağlı	Uygulanmaz	Makro	Tek eksenli Çift Eksenli	Evet			Yöntem diğer ölçüm yöntemleriyle birleştirilebilir
Manyetik	1 mm	20-300 µm	Makro	Tek eksenli Çift Eksenli	Hayır		> 2 mm ²	Mikroyapı, anizotropi ve yüzeye karşı hassas
Ultrasonik	5 mm	> 100 mm numune boyunca	Makro	Tek eksenli Çift Eksenli	Hayır		1-400 mm ²	
Raman/Fluoresan	0.5 µm	Yüzey	Makro	Tek eksenli Çift Eksenli		Kritik Değil	Kritik Değil	

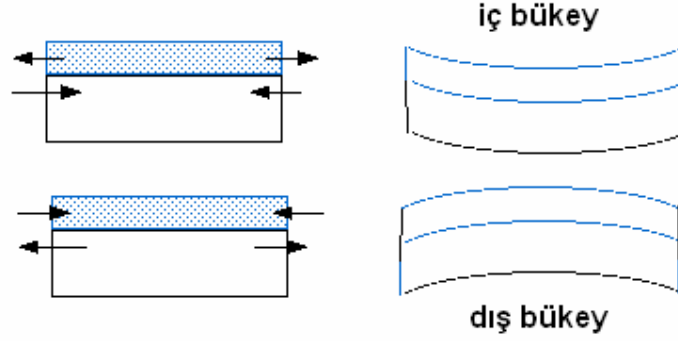
Çizelge 3.4. Artık gerilme ölçüm yöntemlerinin avantajları – dezavantajları [38]

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Delik Delme	Basit, hızlı Geniş kullanım alanı Taşınabilir Geniş malzeme alanı Kalın malzemeler için derin delik delme	Verinin incelenmesi Tahribatlı Sınırlı uzama hassasiyeti ve çözünürlük
X-Ray Kırınım	Çok yönlü, kullanım alanı geniş Geniş malzeme alanı Taşınabilir Makro ve mikro artık gerilme	Basit ölçümler Laboratuvar temelli sistemler Küçük parçalar
Nötron Kırınım	Mükemmel penetrasyon & çözünürlük 3 boyutlu haritalar Makro ve mikro artık gerilme	Uzman kullanımı Laboratuvar temelli sistemler
Katman Kaldırma	Basit Geniş malzeme alanı Diğer yöntemler ile birleştirilebilme	Basit şekiller ile sınırlı Tahribatlı
Manyetik	Çok hızlı Geniş manyetiklenme teknikleri Taşınabilir	Sadece ferromanyetik malzemeler
Ultrasonik	Genellikle mevcut Çok hızlı Düşük maliyet Taşınabilir	Sınırlı çözünürlük

3.5. Katman Kaldırma Metodunun Ayrıntılı Olarak İncelenmesi

Katman kaldırma yöntemi temel olarak, artık gerilme ölçümü yapılacak olan numunelerden aşamalı olarak katmanlar kaldırılarak eğrilik ölçümleri yardımıyla gerilme değerini bulmaya dayanır. Bir katmanın kaldırıldıktan sonra dairesel eğriye çok benzeyen bir şekil alarak dengeye gelir. (Şekil 3.13) Kaldırılan katmanın derinliğinin bir fonksiyonu olarak ölçülen eğrilik, katman kaldırmadan önce numunenin kalınlığına bağlı olarak gerilme dağılımının hesaplanmasında kullanılabilir. Bu yöntemle sadece numunedeki eksene paralel olan gerilmeler hesaplanabilir. [11, 52, 53, 54]

Katman kaldırıldıktan sonra oluşan eğriliği ölçmenin birçok yöntemi mevcuttur. Bunlar arasında CMM cihazları, optik mikroskoplar, lazer tarama gibi net sonuçlar veren cihazların yanı sıra, basit bir komparatör ile de istenilen eğriliğin ölçülme imkânı vardır. Yöntem polimer bazlı malzemelere ve kaplamalara çok başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Fakat katman kaldırma yöntemiyle yüzeye çok yakın gerilmelerin ölçülmesi yapılamamaktadır. [9]

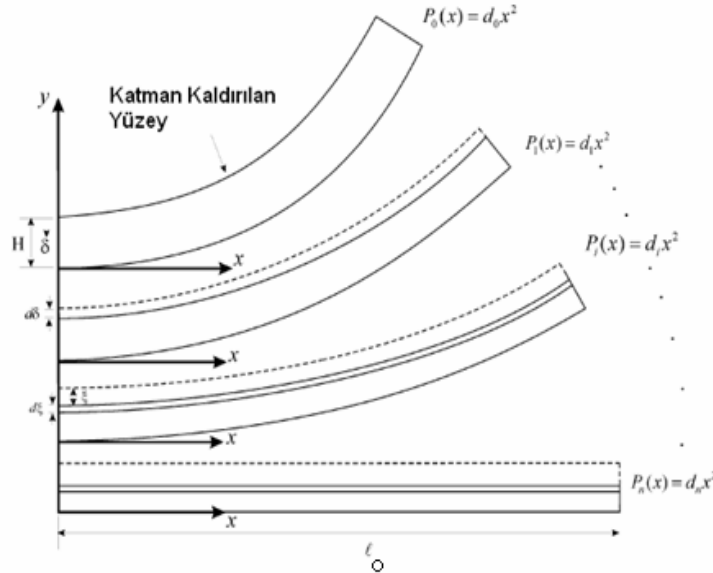


Şekil 3.13. Katman kaldırma sonucu oluşan içbükey ya da dışbükey eğriler [9]

Teorik olarak gerilmeye sahip numuneden katman kaldırma sayesinde yeni bir denge durumuna ulaşılır ve basit bir kiriş için ikinci dereceden bir polinom eğrisi elde edilir. Bu sebeplerden dolayı, $P_i(x)$ numune uzunluğuna bağlı olarak oluşan eğriyi temsil eden ikinci dereceden bir polinom eğrisidir. 3.7 ifadesi $P_i(x)$ denklemini vermektedir:

$$P_i(x) = d_i x^2 \quad (3.7)$$

Şekil 3.14' te her katman kaldırmadan sonraki numunede oluşan eğrilik gösterilmiştir [54]



Şekil 3.14. Katman kaldırma ile numunede oluşan eğrilik [54]

Eğrilik $C(\delta)$, kaldırılan δ katman derinliği için 3.8 eşitliği ile bulunabilir:

$$C_i = \frac{1}{\rho_i} \approx \frac{\partial^2 P_i(x)}{\partial^2 x} = 2d_i \quad (3.8)$$

Her kaldırılan katman neticesinde oluşan yeni denge durumu parça şeklinde bir değişime yol açacaktır. Bu nedenle, artık gerilmenin boyutu, eğilme ve kaldırılan katman biliniyorsa elastisite teorisi kullanılarak bulunabilir. Gerilmeye sahip katman kaldırıldığında, numune dF ve dM kuvvet ve momentlerine sırasıyla 3.9 ve 3.10 eşitliklerine göre maruz kalır:

$$dF = -\sigma^{rl} w d\delta \quad (3.9)$$

$$dM = -\sigma^{rl} \frac{(H - \delta)}{2} w d\delta \quad (3.10)$$

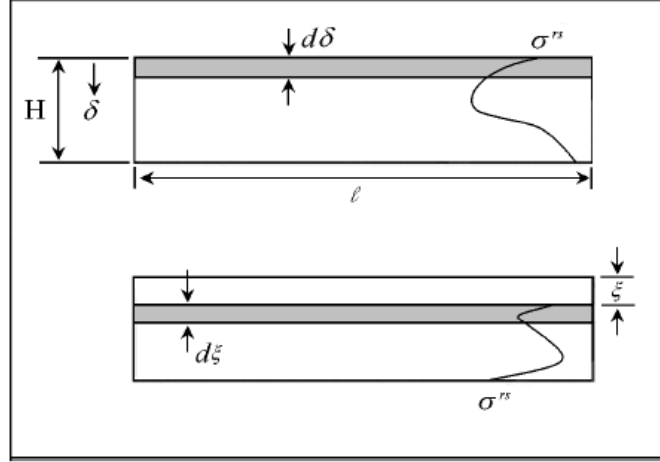
Yeniden bir denge sağlamak için numune bir şekilde karşı bir kuvvet ve moment oluşacak şekilde eğrilir. Numunedeki bu eğriliği ifade eden eğri 3.11 ifadesindeki integralin iki kez integrasyonu ile bulunabilir:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \approx \frac{1}{\rho} = C \quad (3.11)$$

Burada E malzemenin elastisite modülüdür. Artık gerilme sebebiyle oluşan momentin 3.11 ifadesine eklenmesiyle 3.12 ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma^{rl} = -\frac{(H - \delta)^2}{6} E \frac{1}{l^2} \frac{dy}{d\delta} = -\frac{(H - \delta)^2}{6} E \frac{dC(\delta)}{d\delta} \quad (3.12)$$

Buradaki ^{nl} üsteli her kaldırılan katmandaki mevcut artık gerilme değerini verdiği için konulmuştur. Test numunesi gerilmeye sahip katmanların kaldırılmasıyla kuvvet ve momentlere maruz kalır ve her kaldırılan katman numunenin kalan kısmına bir kuvvet ve moment ekler. Bundan dolayı bazı kuvvetler eklenmelidir.



Şekil 3.15. Katman kaldırma [54]

Katman kaldırılmasıyla oluşan dF kuvveti ve dM momenti, $(H-\xi)$ boyutunda 3.13 ifadesindeki gibi normal gerilme değerinde bir değişkenliğe sebep olacaktır:

$$d\sigma_p = d\sigma_n + d\sigma_b \quad (3.13)$$

Normal gerilme ve eğilme gerilmesi sırasıyla 3.14 ve 3.15 ifadeleriyle aşağıda verilmiştir:

$$d\sigma_n = \frac{dF}{w(H-\xi)} = -\frac{1}{6} E(H-\xi) dC(\xi) \quad (3.14)$$

$$d\sigma_b = dM \frac{(H-\delta) - (H-\xi)/2}{w(H-\xi)^3/12} = -E \left\{ (H-\delta) - \frac{1}{2}(H-\xi) \right\} dC(\xi) \quad (3.15)$$

Bundan dolayı gerilme değeri 3.16 ifadesindeki değeri alır:

$$d\sigma_p = \frac{1}{3} E(H-\xi) dC(\xi) - E(H-\delta) dC(\xi) \quad (3.16)$$

$(H-\xi)$ uzaklığı üstündeki katmanların kaldırılmasıyla $(H-\xi)$ boyutundaki toplam gerilme değişimi 3.17 ifadesiyle aşağıda verilmiştir:

$$\Delta\sigma = -E(H - \delta) \int_0^\delta dC(\xi) + \frac{1}{3}E \int_0^\delta (H - \xi) dC(\xi) \quad (3.17)$$

Numunede katman kaldırılmadan önceki artık gerilme 3.18 ifadesine eşit olacaktır:

$$\sigma_p^{rs} = \sigma_p^{rl} + \Delta\sigma_p \quad (3.18)$$

Sonuç olarak 3.12 ve 3.17 ifadelerinin birbirilerine eklenmesiyle artık gerilme ifadesi 3.19' daki halini alır:

$$\sigma^{rs}(\delta) = -\frac{1}{6}E(H - \delta)^2 \frac{dC(\delta)}{d\delta} + \frac{2}{3}E(H - \delta)C(\delta) - \frac{1}{3}EC(0)(3\delta - 2H) - \frac{1}{3}E \int_0^\delta C(\xi) d\xi \quad (2.19)$$

3.6. Artık Gerilmelerin Etkileri

Artık gerilmelerin malzemelerin çalışma performansına olan etkileri her geçen gün artan bir teknoloji ve kullanım alanı ile araştırılmaktadır. Örneğin gevrek malzemelerin statik yüklenme performanslarının artık gerilmelerin dikkatli kullanılmasıyla arttırılma çalışmaları; özellikle ısıtıl işlem görmüş ve toklaştırılmış cam ve ön gerilmeli beton üzerinde yoğunlaşmıştır. [40]

Plastik olarak deforme olan malzemeler için artık ve uygulanan gerilmeler direk olarak akma dayanımı elde edilene dek eklenebilirler. Bunun için artık gerilmeler plastik deformasyonun başlamasının hızlandırabilir veya durdurabilirler; buna rağmen statik sünek eksikliği uyumsuz uzamaların küçük olmasından ve daha sonra bu uzamaların plastisite tarafından iptal edilmesinden dolayı genellikle küçüktür. [40]

3.7. Artık Gerilmelerin Kontrol Edilmesi

Bir parçadaki artık gerilmeleri kontrol edilmesinin bilimsel bir yolu aşağıdaki adımları içermelidir:

- Gerilme üreten temel kaynakların saptanması
- Özel bir üretim prosesinde artık gerilmelere sebep olabilecek parametrelerin tanımlanması
- Göreceli olarak tanımlanan bu parametrelerin her birinin öneminin saptanması
- Artık gerilme dağılımının elde edilen sonuçlarının uygun bir kombinasyon yaparak en önemli proses parametreleriyle deney yapılması

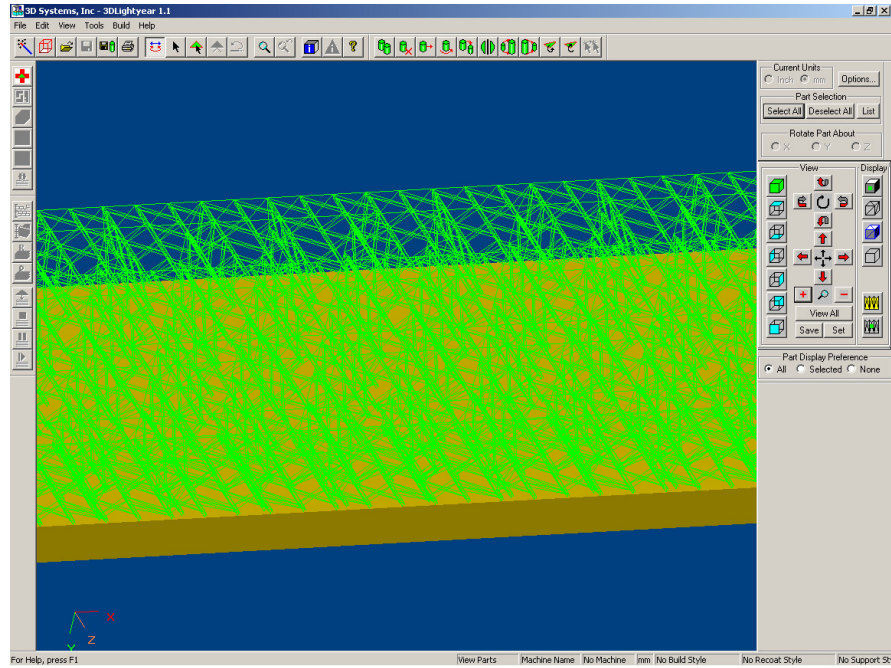
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu çalışmada stereolitografi numunelerde artık gerilme incelenmesi katman kaldırma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. SLA 7000 cihazında farklı parametreler kullanılarak 4 farklı deney numunesi 150 mm x 15 mm x 8 mm (uzunluk x genişlik x kalınlık) boyutlarında üretilmiştir. Deney numunelerinin parametreleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

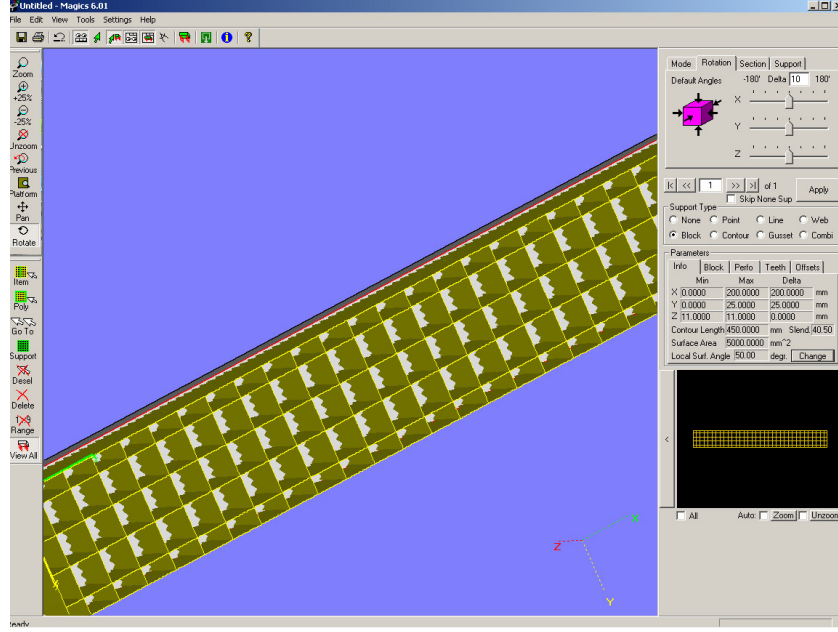
Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan numunelerin parametreleri

Numune	Malzeme	Katman Kalınlığı (mm)	Destek Yapısı
P1	Somos 11120	0,1	Üçgen
P2	Somos 11120	0,1	Kare
P3	Somos 11120	0,15	Üçgen
P4	Somos 11120	0,15	Kare

Şekil 4.1 ve 4.2, numunelerde kullanılan üçgen ve kare destek yapılarını göstermektedir.

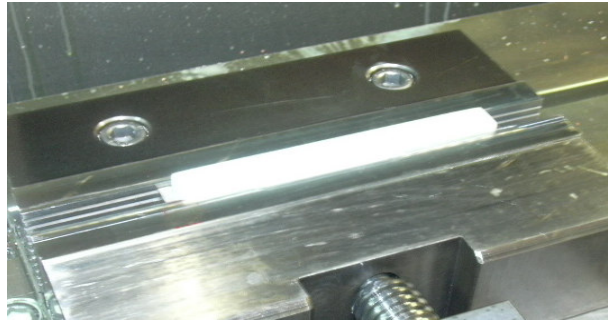


Şekil 4.1. Numunelerin üretiminde kullanılan üçgen destek yapısının görünümü



Şekil 4.2. Numunelerin üretiminde kullanılan kare destek yapısının görünümü

Üretilen deney numunelerindeki artık gerilme incelenmesi için katman kaldırma yöntemi kullanılmıştır. Katman kaldırma işlemi için MAZAK VTC-300 tezgâhında Ø16 mm 6 kesme ağızlı karbür freze kullanılarak yapılmıştır. Katman kaldırma işlemi sırasında 4000 devir/dak ve 400 mm/dak ilerleme değerleri kullanılmıştır. Numunelerden katman kaldırılmadan önce tezgaha bağlanmasının görüntüsü Şekil 4.3’ te verilmiştir.



Şekil 4.3. Numunenin tezgaha bağlanma şekli

Kalınlığı 8 mm olan 4 adet numuneden her seferinde 0,5 mm olmak üzere toplam 4,5 mm katman kaldırılarak artık gerilme incelemesi yapılmıştır. Her katman kaldırma işleminden sonra 5’er dakika süreyle beklenerek gerilme dağılımının oturması beklenmiştir.

Numunelerin ilk yüzeyleri ve her katman kaldırılmasından sonraki eğrilik ölçümleri MITUTOYO PJ-A3000 profil projektör cihazında yapılmıştır. Profil projektör cihazının görüntüsü Şekil 4.4 ' te verilmiştir.



Şekil 4.4. Profil projektör cihazının görüntüsü

Ölçümler yapılırken; numuneler 160x45 mm boyutlarında ve yüzeyleri 0,05 mm hassasiyetle taşlanmış bir dikdörtgen plaka üzerine vida ile bağlanmıştır. Böylelikle her ölçümün aynı noktadan ve aynı hassasiyetle yapılması sağlanmıştır. Numunelerin ölçüm için plakaya bağlanmış görüntüsü Şekil 4.5' te verilmiştir.



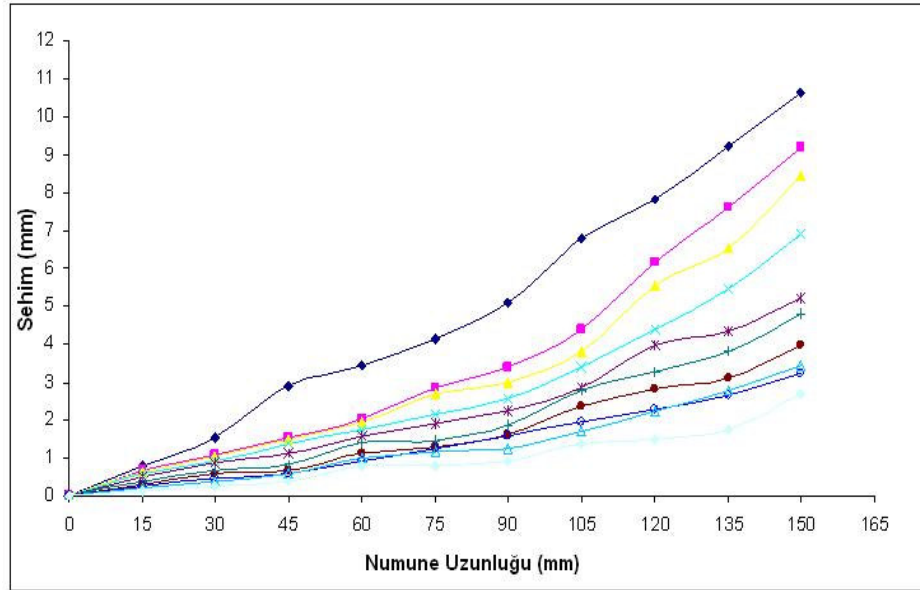
Şekil 4.5. Numunelerin plakaya bağlanmış görüntüsü

Şekil 4.6’ da numunelerin profil projeksiyon cihazından ölçüm için yerleştirilmesi ve cihazın ekranına yansıyan görüntüsü verilmiştir.



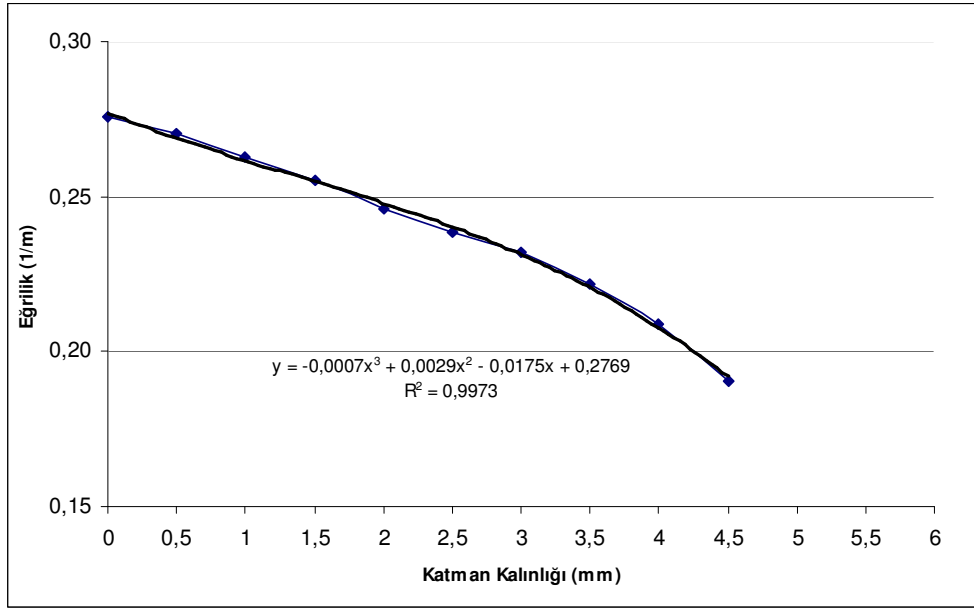
Şekil 4.6. (a) Ölçüm için tezgah tablasına yerleşim (b) Ekrandaki ölçüm için oluşan görüntü

P1 numunesinin artık gerilme ölçümü için her katman kaldırma sonucunda oluşan sehim 15'er mm aralıklar ile ölçülmüş ve kaydedilen değerler Şekil 4.7' de verilmiştir.



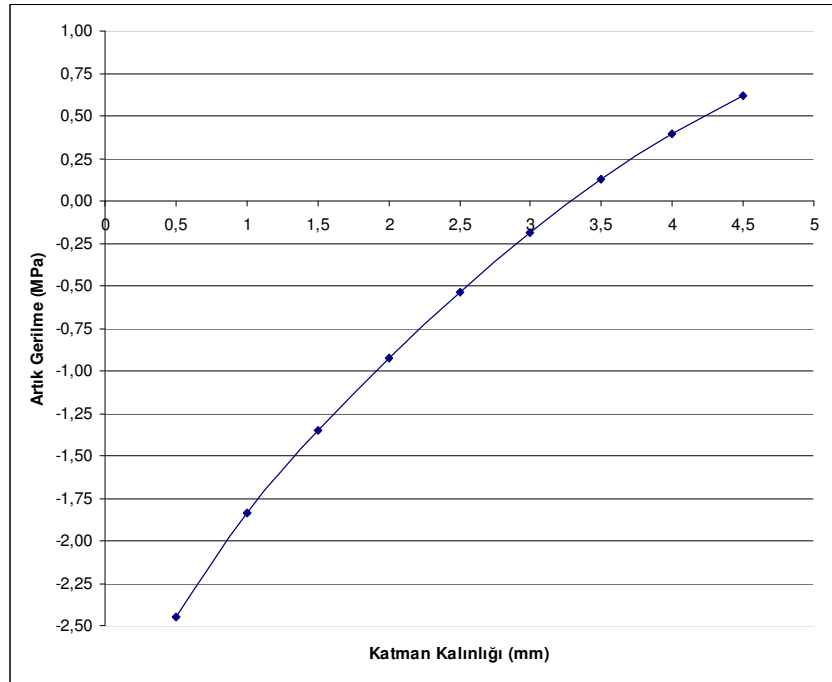
Şekil 4.7. P1 Numunesine Ait Sehım Grafiği

Bulunan sehım değerleri neticesinde oluşan eğriliğin yarıçapı ölçülmüş ve her katman kaldırma işleminin sonucunda oluşan eğrilik Şekil 4.8’de görülen grafiğe işlenmiştir. Oluşan noktalardan 3.dereceden eğri uydurulmuştur.



Şekil 4.8. P1 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği

Eğri uydurma yöntemiyle bulunan denklem artık gerilme hesaplamalarında kullanılmış ve sonuç olarak P1 numunesindeki artık gerilme dağılımının grafiği Şekil 4.9.'daki gibi elde edilmiştir.

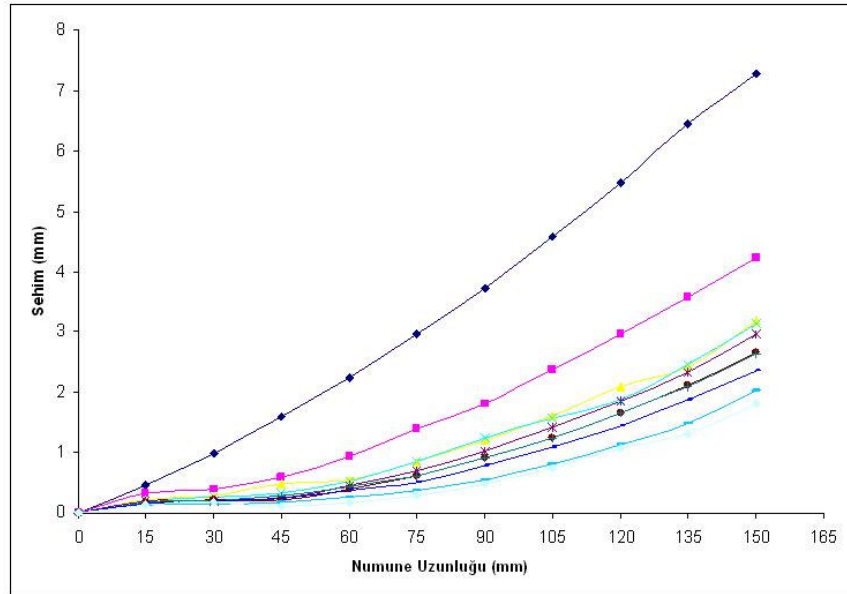


Şekil 4.9. P1 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları

P1 numunesinde artık gerilme değerleri 0,5–3 mm kalınlıklarda basma artık gerilmesi şeklinde ve minimum 2,45 MPa değerinde olmak üzere 2,45 ile 0,18 MPa değerleri arasında değişmektedir. 3 mm kalınlıktan sonra ise artık gerilme değerleri çekme şeklini alıp maksimum 0,62 MPa değerine ulaşmaktadır.

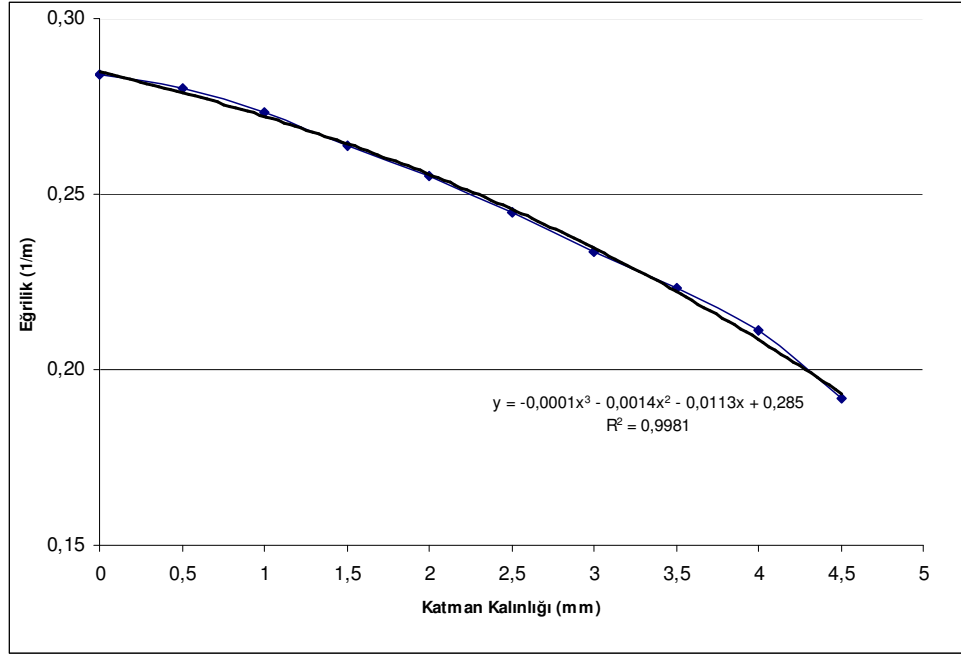
Bu numuneye ait ölçülen sehim sonuçları ve artık gerilme hesaplanması için bulunan değerler Ek-1’ de verilmiştir.

P2 numunesinin artık gerilme ölçümü için her katman kaldırma sonucunda oluşan sehim 15’er mm aralıklar ile ölçülmüş ve kaydedilen değerler Şekil 4.10’ da verilmiştir.



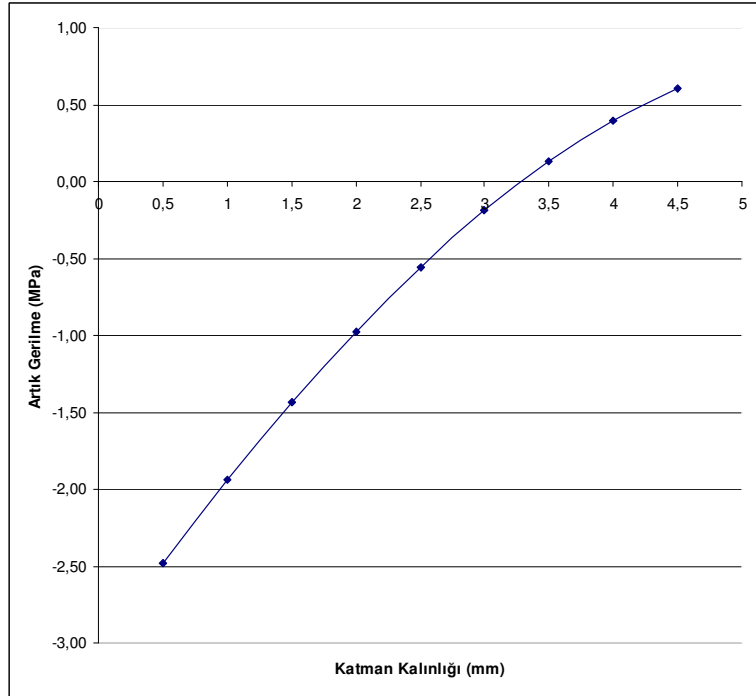
Şekil 4.10. P2 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği

Bulunan sehim değerleri neticesinde oluşan eğriliğin yarıçapı ölçülmüş ve her katman kaldırma işlemi sonucunda oluşan eğrilik Şekil 4.11’de görülen grafiğe işlenmiştir. Oluşan noktalardan 3.dereceden eğri uydurulmuştur.



Şekil 4.11.P2 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları

Eğri uydurma yöntemiyle bulunan denklem artık gerilme hesaplamalarında kullanılmış ve sonuç olarak P2 numunesindeki artık gerilme dağılımının grafiği Şekil 4.12.’deki gibi elde edilmiştir.

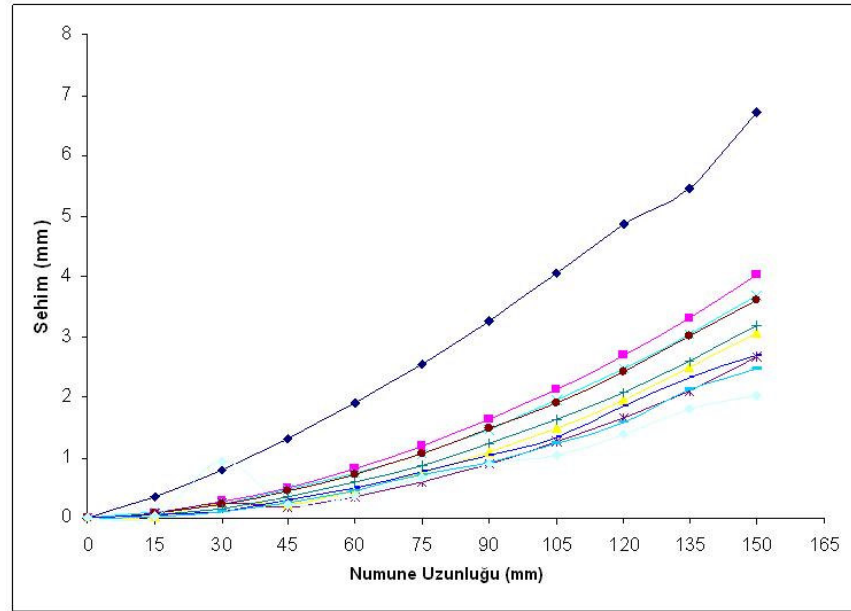


Şekil 4.12. P2 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları

P2 numunesinde de artık gerilme sonuçları P1 numunesine yakın değerlerde bulunmuştur. 0,5–3 mm kalınlıklarda basma artık gerilmeleri minimum 2,48 MPa değerinde olmak üzere 2,48 ile 0,19 MPa değerlerinde hesaplanmıştır. Bu kalınlıktan sonra ise aynı şekilde çekme artık gerilmesi şekline dönüp, maksimum 0,61 MPa değerine ulaşmaktadır.

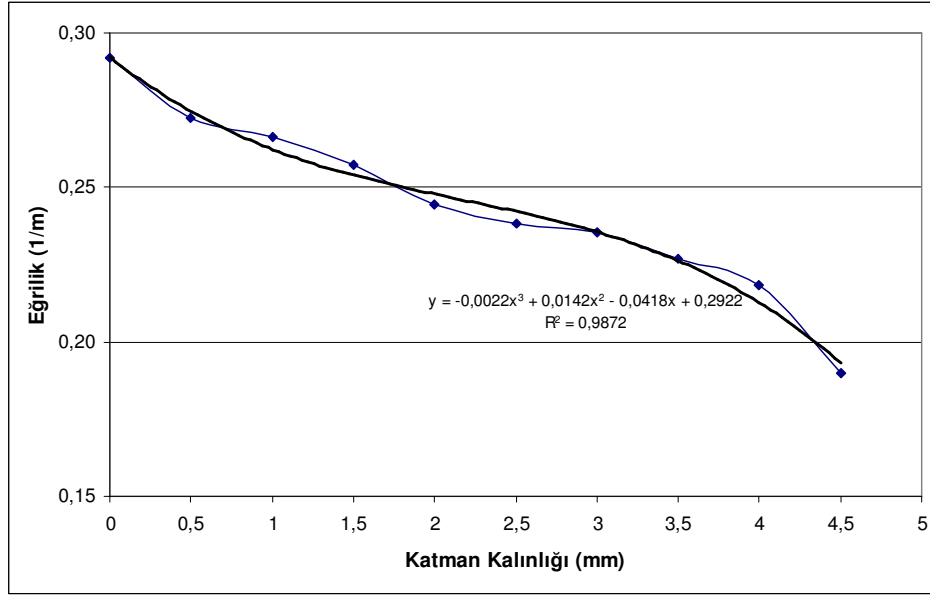
Bu numuneye ait ölçülen sehim sonuçları ve artık gerilme hesaplanması için bulunan değerler Ek-2’ de verilmiştir.

P3 numunesinin artık gerilme ölçümü için her katman kaldırma sonucunda oluşan sehim 15’er mm aralıklar ile ölçülmüş ve kaydedilen değerler Şekil 4.13’ te verilmiştir.



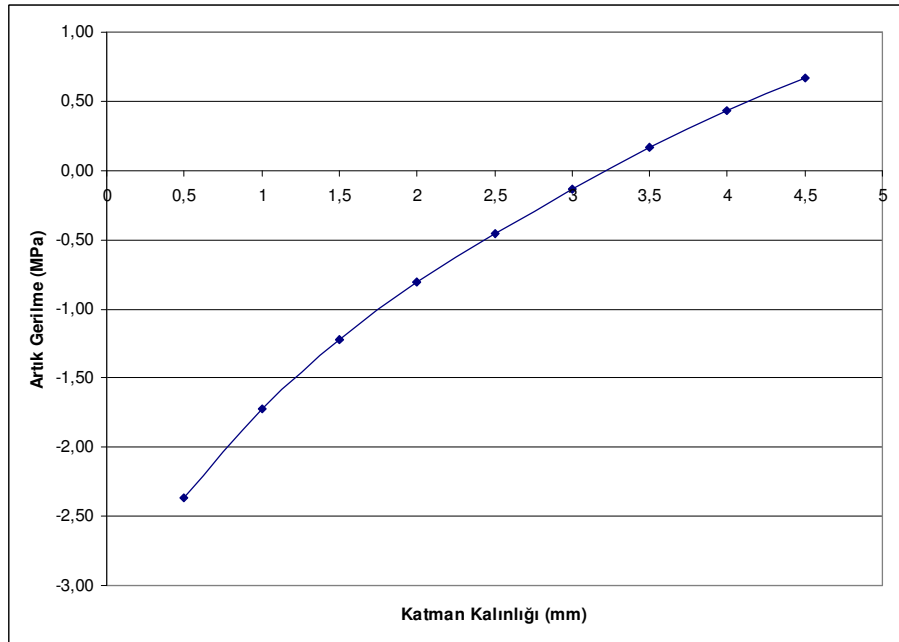
Şekil 4.13. P3 Numunesine Ait Sehim Grafiği

Bulunan sehim değerleri neticesinde oluşan eğriliğin yarıçapı ölçülmüş ve her katman kaldırma işlemi sonucunda oluşan eğrilik Şekil 4.14’te görülen grafiğe işlenmiştir. Oluşan noktalardan 3.dereceden eğri uydurulmuştur.



Şekil 4.14. P3 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği

Eğri uydurma yöntemiyle bulunan denklem artık gerilme hesaplamalarında kullanılmış ve sonuç olarak P3 numunesindeki artık gerilme dağılımının grafiği Şekil 4.15’ teki gibi elde edilmiştir.

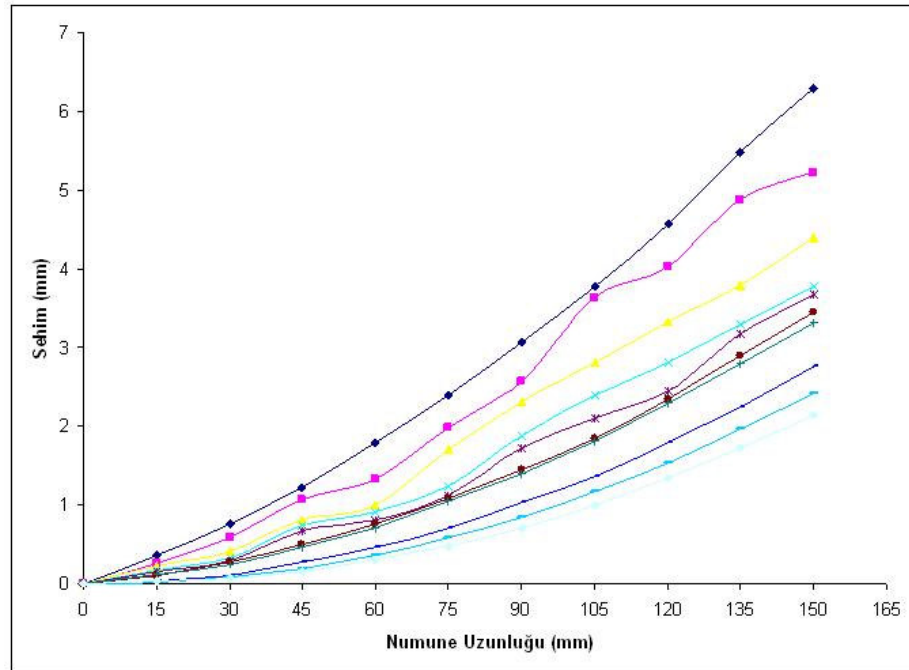


Şekil 4.15. P3 Numunesine Ait Artık Gerilme Sonuçları

P3 numunesi bilindiği üzere 0,15 katman kalınlığı ile üretilmiştir. Bu numuneye ait artık gerilme değerleri ise 0,5–3 mm kalınlıklar arasında minimum 2,36 MPa değerine ulaşarak basma artık gerilmesi şeklinde oluşmakta ve bu değerler 2,36 ile 0,13 MPa arasında değişmektedir. Bu kalınlıktan itibaren ise çekme artık gerilmesine dönüşmekte ve maksimum 0,67 MPa değerine ulaşmaktadır.

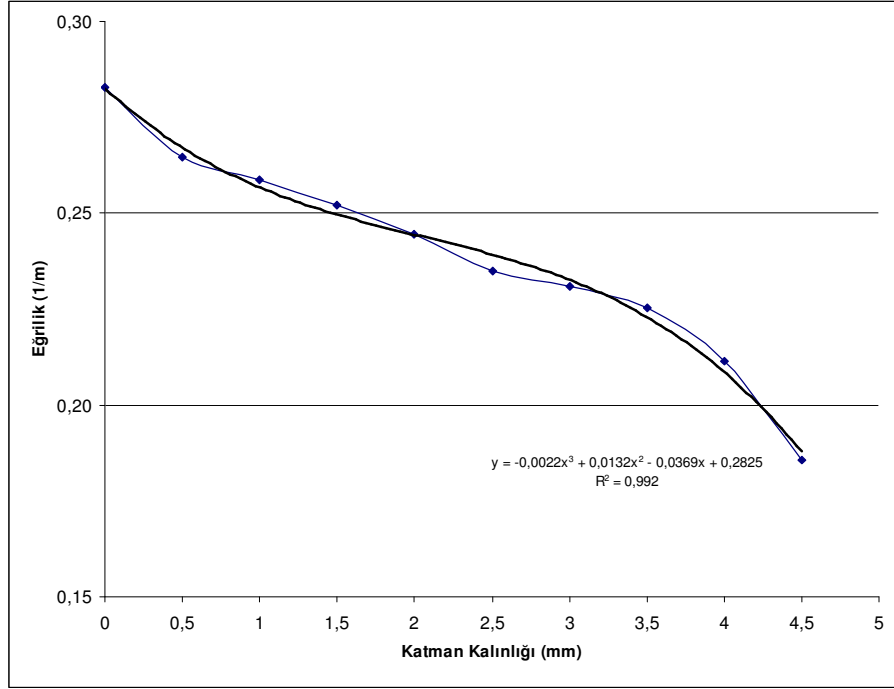
Bu numuneye ait ölçülen sehim sonuçları ve artık gerilme hesaplanması için bulunan değerler Ek-3’ te verilmiştir.

P4 numunesinin artık gerilme ölçümü için her katman kaldırma sonucunda oluşan sehim 15’er mm aralıklar ile ölçülmüş ve kaydedilen değerler Şekil 4.16’ da verilmiştir.



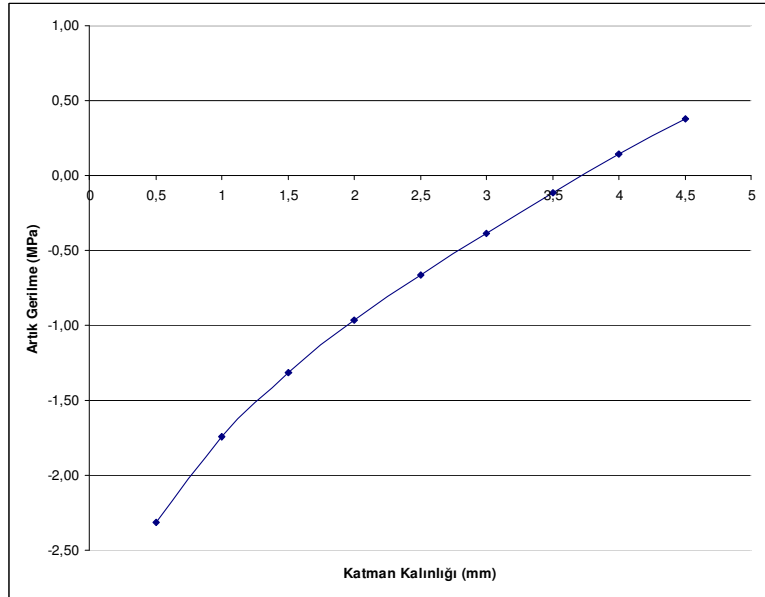
Şekil 4.16. P4 Numunesine Ait Sehim Grafiği

Bulunan sehim değerleri neticesinde oluşan eğriliğin yarıçapı ölçülmüş ve her katman kaldırma işlemi sonucunda oluşan eğrilik Şekil 4.17’ de görülen grafiğe işlenmiştir. Oluşan noktalardan 3.dereceden eğri uydurulmuştur.



Şekil 4.17. P4 Numunesine Ait Eğrilik Grafiği

Eğri uydurma yöntemiyle bulunan denklem artık gerilme hesaplamalarında kullanılmış ve sonuç olarak P4 numunesindeki artık gerilme dağılımının grafiği Şekil 4.18’ deki gibi elde edilmiştir.

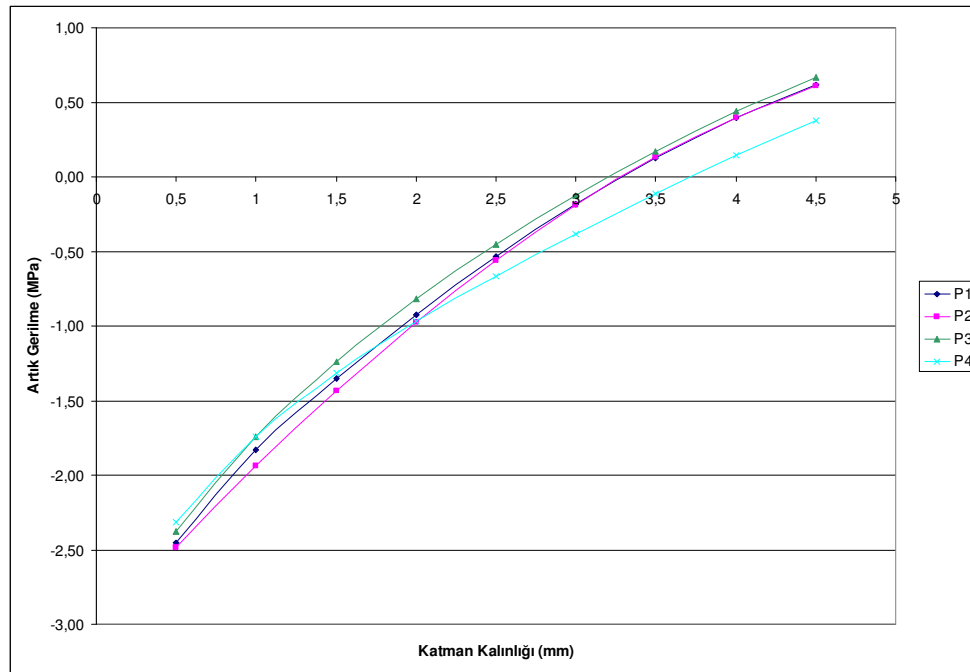


Şekil 4.18. P4 Numunesine Ait Artık Gerilme Grafiği

P4 numunesi ise P3 numunesi ile aynı katman kalınlığı ile fakat farklı destek yapıları kullanılarak üretilmiştir. 0,5–3 mm kalınlıklar arasında minimum 2,32 MPa değerinde olan basma artık gerilmeleri 2,32 ile 0,11 MPa değerleri arasında değişmekte ve bu noktadan sonra maksimum 0,38 MPa değerinde çekme artık gerilmesi şeklini almaktadır.

Bu numuneye ait ölçülen sehim sonuçları ve artık gerilme hesaplanması için bulunan değerler Ek-4' te verilmiştir.

Şekil 4.19.; tüm numunelerde elde edilen artık gerilme sonuçlarını göstermektedir. Ek-5' te artık gerilme sonuçlarının çizelgesi bulunmaktadır.



Şekil 4.19. Tüm numunelerdeki artık gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Katman kaldırma yöntemiyle 0,5' er mm katman kaldırılarak elde edilen sonuçlar katman kalınlığı ve destek yapılarına göre irdelenmiştir.

0,1 mm katman kalınlığı ile farklı destek yapıları kullanılarak üretilen P1 ve P2 numunelerinde destek yapılarının etkisi incelendiğinde; P2 numunesinde 3 mm katman kaldırma kalınlığına kadar, artık gerilmelerin P1 numunesine göre 0,03 ila 0,11 MPa fazla olduğu görülmüştür. 3 ila 4,5 mm katman kaldırma kalınlığı arasından itibaren sonuçların eş olduğu gözlenmiştir. Yani 0,1 mm katman kalınlığında üretilen prototiplerde 3 mm katman kaldırma kalınlığına kadar üçgen destek kullanılması daha düşük basma gerilmeleri sonucunu vermiştir. Fakat 3–4,5 mm katman kaldırma kalınlığı arasında P1 ve P2 numunesinde ortak olarak gözlenen sonuç, prototiplerde gerilme değerlerinin itibaren çekme artık gerilmesi halini almasıdır ve eşit değerlerde olmasıdır.

0,1 mm katman kalınlığı ile farklı destek yapıları kullanılarak üretilen P3 ve P4 numunelerinde destek yapılarının etkisi incelendiğinde; gerilmenin basma yönünde olması halinde P1 ve P2 numunelerindeki gerilme değerlerine benzer sonuçlar vermiştir. P3 numunesinde 3 mm katman kaldırma kalınlığına kadar, P4 numunesine göre daha düşük basma gerilmesi sonuçları vermiştir. Sadece 0,5 mm katman kaldırma kalınlığında P3 numunesindeki gerilme P4 numunesine göre 0,05 MPa yüksek değerde hesaplanmıştır.

Üçgen destek yapısıyla fakat farklı katman kalınlıklarında üretilen P1 ve P3 numunelerinde artık gerilme dağılımına bakıldığında; 3 mm katman kalınlığına kadar 0,15 mm katman kalınlığı ile üretilen P3 numunesinde daha düşük basma artık gerilmesi değerleri elde edilmiştir. 3–4,5 mm katman kaldırma kalınlıkları arasında ise her iki numunede de çekme artık gerilmesi değerleri bulunmuş fakat 0,15 mm katman kalınlığındaki P3 numunesinde daha büyük çekme gerilmesi değerleri elde edilmiştir.

Kare destek yapısıyla üretilen P2 ve P4 numunelerinde ise; 0,5–2 mm katman kaldırma kalınlıklarında hesaplanan artık gerilme değerleri basma şeklinde olup 0,15 mm katman kalınlığıyla üretilen P2 numunesinde daha düşük değerler elde edilmiştir. 2,5–3 mm katman kaldırma kalınlıkları arasında ise P4 numunesindeki değerler daha büyük olmaktadır. Bu noktadan itibaren P2 numunesindeki artık gerilme değerleri P4 numunesine göre daha yüksek değerlerde çıkmaktadır.

Deneylet neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Prototip imalatı sırasında katman kalınlığının artması basma gerilmelerini düşürmektedir.
- Fakat gerilmenin çekme yönüne dönmesiyle gerilmelerin katman kalınlığı ve destek yapılarıyla beraber olarak değıştiğı gözlemlenmiştir.
- Üçgen destek yapı kullanıldığında katman kalınlığının artması çekme gerilmelerini arttırmakta, buna rağmen kare destek yapı kullanıldığında katman kalınlığının artması çekme gerilmelerini azaltmaktadır.
- Basma gerilmesine maruz kalan yapılarda dayanımın yüksek olması isteniyorsa üçgen destek yapıları kullanılmalıdır.
- Buna karşın çekme gerilmesine maruz kalan yapılarda ise yüksek dayanım elde etmek için kare destek yapıları kullanılmalıdır.

Epoksi bazlı reçineden SLA yöntemiyle üretilen prototip parçaların endüstriyel olarak kullanım alanı çok fazla değildir. Bu tür parçaların konstrüksiyonlardaki kullanım alanları arttıkça, artık gerilmelerin de etkisinin incelenmesi daha önemli bir hal alacaktır.

Hem basma hem de çekme gerilmelerine maruz kalan yapılarda; gerilmenin negatif değerlerde olduğı yerlerde üçgen destek, pozitif olduğı yerlerde ise kare destek kullanılarak üretilecek prototiplerde artık gerilmelerin hesaplanması ileride yapılacak olan çalışmalar için yol gösterebilecek bir konu olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] By Design News Staff, “Rapid Prototyping Advances, New machines and materials drive growth”, Design News, 2006
- [2] www.prm.ucl.ac.be/cours/meca2455/cours_02-03/Overview_Rapid_Prototyping.pdf
- [3] Chua, C., K., Leong, K., F., Lim, C., S., “Rapid Prototyping - Principles and Applications”, World Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd., 2004
- [4] Grimm, T., “User’s Guide to Rapid Prototyping”, Society of Manufacturing Engineers, 2004
- [5] Charles, L., T., “Rapid Prototyping”, ASM Handbook, Volume 20
- [6] Lu, J., James, M., Roy, G., “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, Society of Experimental Mechanics, Fairmont Press ; Upper Saddle River, NJ, 1996
- [7] Chandra, U., “Control of Residual Stress”, ASM Handbook, Volume 20
- [8] http://www.twittraining.com/professional/protected/band_3/ksrhl001.html
- [9] www.npl.co.uk/materials/residualstress
- [10] Hauk, V., “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods”, Elsevier Science B.C., Netherlands, 1997
- [11] Turnbull, A., Maxwell, A., S., Pillai, S., “Residual Stress In Polymers-Evaluation of Measurement Techniques”, Journal of Materials Science, Volume 34, Pages 451-459, 1999
- [12] Karalekas, D., Rapti, D., Gdoutos, E., E., Aggelopoulos, A., “Investigation of Shrinkage-induced Stresses in Stereolithography Photo-curable Resins”, Experimental Mechanics, Volume 42, No 4, Pages 1-6, 2002
- [13] Karalekas, D., Rapti, D., “Investigation of the processing dependence of SL solidification residual stresses”, Rapid Prototyping, Volume 8, No 4, Pages 222-247, 2002
- [14] Onuh, S., S., Yusuf, Y., Y., “Rapid prototyping technology: applications and benefits for rapid product development”, Journal of Intelligent Manufacturing, Cilt 10, 1999, 301-311
- [15] Burns, M., “Automated fabrication : improving productivity in manufacturing”, Englewood Cliffs, N.J. : PTR Prentice Hall, 1993
- [16] www.cadem.com.tr
- [17] Jacobs, P., F., “Rapid Prototyping&Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography”, Society of Manufacturing Engineers, United States of America, 1992
- [18] Ekşi, M., “Kalıplı İmalatta Hızlı Prototipleme Teknolojisi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [19] Hashan, İ., Kişisel Görüşme, Prototip&BDÜ Uzmanı, Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İSTANBUL, 2006
- [20] www.turkcadcam.net
- [21] www.3dsystems.com
- [22] Noorani, R., I., “Rapid Protoyping: Principles and Applications”, Wiley, United States of America, 2005
- [23] Venüviod, P., K., Ma, W., “Rapid Prototyping-Laser Based and Other Technologies”, Kluwer Academic Publishers Group, Netherlands, 2004
- [24] www.dsm.com

- [25] Weiss, L., E., "SFF Processes," JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan. March 1997.
- [26] C. Atwood, R. Aubin, P. Fussell, Japanese and World Technology Evaluation Centers,
- [27] www.msoe.edu/reu/research_papers/Cottrill%20Paper.pdf
- [28] <http://rapid-prototyping.harvest-tech.com/>
- [29] <http://www.3trpd.co.uk/architecture/services.htm#sls>
- [30] www.warwick.ac.uk/atc/rpt
- [31] McMains, A., S., "Rapid Prototyping of Solid Three-Dimensional Parts", Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, California Üniversitesi, 1995
- [32] www.camlem.com
- [33] www.ennex.com
- [34] www.materialise.be
- [35] www.npaci.edu/enVision/v15.1/tmf.html#Anchor-VISUALIZING-61993
- [36] emsh.calarts.edu/~mathart
- [37] www.mit.edu:8001/activities/tdp/porousfilters.html
- [38] Kandil, F., A., Lord, J., D., Fry, A., T., Grant, P., V., "A Review of Residual Stress Measurement Methods -A Guide to Technique Selection", NPL Report MATC(A)04, February 2001
- [39] Winholtz, R., A., Cohen, J., B., "Changes In Macro stresses and Micro stresses In The Steel With Fatigue", Materials Science and Engineering:A, Volume 154, Issue 2 , 15 July 1992, Pages 155-163
- [40] Withers, P., J., Bhadeshia, H., K., D., H., "Residual stress Part 1 – Measurement Techniques", Materials Science and Technology, Volume 17, Issue 4, April 2001, Pages 355-365
- [41] Withers, P., J., Bhadeshia, H., K., D., H., "Residual stress Part 2 – Nature and Origins", Materials Science and Technology, Volume 17, Issue 4, April 2001, Pages 366-375
- [42] ASTM E837-01e, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method
- [43] Lord, J., "Hole Drilling Techniques", NPL-BCA Structural Material Workshop, 12 Eylül 2000
- [44] Ekmekçi, B., Tekkaya, E., A., Erden, A., "A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, Pages 858-868, 2006
- [45] Kafkas, F., "Katman Kaldırma Tekniğine Dayalı Olarak Kalıcı Gerilmelerin Ölçülmesini Sağlayan Bilgisayarlı Ölçme Cihazının Tasarımı ve İmalatı", Gaz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [46] http://www.h-and-m-analytical.com/pdfs/residual_stress.pdf
- [47] Zhang, Y., Pratihari, S., Fitzpatrick, M., E., Edwards, L., "Residual Stress Mapping in Welds using the Contour Method", Department of Materials Engineering, The Open University, Milton Keynes, MK7 6AA, UK
- [48] Fry, A., T., "Sensitivity Evaluation for X-Ray Diffraction Residual Stress Measurements", NPL Report MATC(104)A, April 2002
- [49] Young, K., A., "Machining-Induced Residual Stress and Distortion of Thin Parts", Doktora Tezi, Washington Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mayıs 2005

- [50] Smith, D., J., Leggatt, R., H., Webster, G., A., Macgillivray, H., J., Webster, P., J., Mills, G., “Neutron-Diffraction Measurements of Residual-Stress and Plastic-Deformation in an Aluminum-Alloy Weld”, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Volume 23 Issue 4, Pages 201-211
- [51] Ersoy, N., Vardar, Ö., “Measurement of Residual Stresses in Layered Composites by Compliance Method”, *Journal of Composite Materials*, Volume 34, Issu 07/2000, Pages 575-598
- [52] White, J. R., “On The Layer Removal Analysis of Residual Stress Part 1 Polymer Mouldings with Depth-varying Young's Modulus”, *Journal of Materials Science*, Volume 20, Pages 2377-2387, 1985
- [53] Bansen, K., M., B., Orij, J., J., W., Meijer, C., Z., Van Dijk, D., J., “Comparison of Residual Stress Predictions and Measurement Using Excimer Laser Layer Removal”, *Polymer Engineering And Science*, Volume 39, Issue 10, Pages 2030-2041, October 1999
- [54] Ekmekçi, B., Elkoca, O., Tekkaya, E., A., Erden, A., “Residual Stress State and Hardness Depth in Electric Discharge Machining: De-Ionized Water as Dielectric Liquid”, *Machining Science and Technology*, Volume 9, Pages 39-61, 2005

EKLER

Ek 1 P1 Numunesine Ait Sehim ve Artık Gerilme Hesaplama Sonuçları

Ek 2 P2 Numunesine Ait Sehim ve Artık Gerilme Hesaplama Sonuçları

Ek 3 P3 Numunesine Ait Sehim ve Artık Gerilme Hesaplama Sonuçları

Ek 4 P4 Numunesine Ait Sehim ve Artık Gerilme Hesaplama Sonuçları

Ek 5 Tüm Numunelerdeki Artık Gerilme Sonuçlarının Çizelgesi

Ek 1 P1 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri

P1 Numunesine Ait Sehim, Yarıçap ve Eğrilik Değerleri

#	Genişlik (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	Yarıçap (m)	Eğrilik (1/m)
0	İlk Yüzey	0	0,787	1,533	2,876	3,442	4,145	5,078	6,79	7,827	9,244	10,626	3,62769	0,2757
1	0,5	0	0,657	1,068	1,540	2,034	2,847	3,389	4,405	6,160	7,620	9,203	3,70025	0,2703
2	1	0	0,625	1,025	1,486	1,928	2,699	2,979	3,813	5,538	6,537	8,430	3,80395	0,2629
3	1,5	0	0,588	0,925	1,354	1,726	2,143	2,547	3,374	4,403	5,478	6,931	3,91608	0,2554
4	2	0	0,503	0,877	1,099	1,590	1,885	2,254	2,867	3,984	4,329	5,226	4,06688	0,2459
5	2,5	0	0,389	0,654	0,842	1,426	1,452	1,847	2,758	3,252	3,797	4,801	4,19569	0,2383
6	3	0	0,305	0,583	0,679	1,132	1,298	1,631	2,346	2,823	3,118	3,987	4,31265	0,2319
7	3,5	0	0,242	0,461	0,578	0,912	1,256	1,581	1,942	2,273	2,662	3,212	4,50612	0,2219
8	4	0	0,206	0,352	0,561	1,002	1,175	1,239	1,683	2,231	2,778	3,423	4,78448	0,2090
9	4,5	0	0,132	0,265	0,357	0,784	0,782	0,896	1,357	1,504	1,737	2,689	5,24688	0,1906

P1 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları

Katman 1			Katman 2			Katman 3			Katman 4			Katman 5		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-2,45	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,83	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,35	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,92	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,53	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	0,50	mm	δ	1,00	mm	δ	1,50	mm	δ	2,00	mm	δ	2,50	mm
C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm
C(δ)	0,28	mm ³	C(δ)	0,26	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³	C(δ)	0,24	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,04	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,05	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,12	mm ⁴

Katman 6			Katman 7			Katman 8			Katman 9		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,18	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,13	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,40	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,62	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	3,00	mm	δ	3,50	mm	δ	4,00	mm	δ	4,50	mm
C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm	C(0)	0,2769	mm
C(δ)	0,23	mm ³	C(δ)	0,22	mm ³	C(δ)	0,21	mm ³	C(δ)	0,19	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,05	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,06	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,07	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,09	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,12	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,10	mm ⁴

Ek 2 P2 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri

P2 Numunesine Ait Sehim, Yarıçap ve Eğrilik Değerleri

#	Genişlik (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	Yarıçap (m)	Eğrilik (1/m)
0	İlk Yüzey	0	0,451	0,989	1,586	2,253	2,955	3,727	4,581	5,474	6,462	7,271	3,52151	0,2840
1	0,5	0	0,319	0,393	0,59	0,935	1,389	1,82	2,366	2,959	3,569	4,233	3,56953	0,2801
2	1	0	0,227	0,291	0,482	0,549	0,852	1,2	1,62	2,097	2,423	3,182	3,65679	0,2735
3	1,5	0	0,204	0,263	0,33	0,525	0,86	1,243	1,567	1,881	2,47	3,146	3,78870	0,2639
4	2	0	0,188	0,201	0,247	0,447	0,696	1,029	1,41	1,856	2,326	2,975	3,91942	0,2551
5	2,5	0	0,179	0,209	0,226	0,384	0,614	0,906	1,245	1,65	2,113	2,656	4,08569	0,2448
6	3	0	0,165	0,194	0,275	0,428	0,611	0,907	1,248	1,648	2,091	2,644	4,27958	0,2337
7	3,5	0	0,142	0,198	0,237	0,376	0,504	0,778	1,093	1,432	1,871	2,356	4,48265	0,2231
8	4	0	0,138	0,144	0,168	0,265	0,379	0,547	0,811	1,126	1,487	2,033	4,73600	0,2111
9	4,5	0	0,121	0,165	0,11	0,175	0,291	0,474	0,738	1,058	1,304	1,817	5,21659	0,1917

P2 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları

Katman 1			Katman 2			Katman 3			Katman 4			Katman 5		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-2,48	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,94	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,44	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,98	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,56	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	0,50	mm	δ	1,00	mm	δ	1,50	mm	δ	2,00	mm	δ	2,50	mm
C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm
C(δ)	0,28	mm ³	C(δ)	0,27	mm ³	C(δ)	0,26	mm ³	C(δ)	0,26	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴

Katman 6			Katman 7			Katman 8			Katman 9		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,19	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,13	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,40	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,61	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	3,00	mm	δ	3,50	mm	δ	4,00	mm	δ	4,50	mm
C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm
C(δ)	0,24	mm ³	C(δ)	0,22	mm ³	C(δ)	0,21	mm ³	C(δ)	0,20	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,12	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,10	mm ⁴

Ek 3 P3 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri

P3 Numunesine Ait Sehim, Yarıçap ve Eğrilik Değerleri

	Genişlik (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	Yarıçap (m)	Eğrilik (1/m)
0	İlk Yüzey	0,000	0,341	0,784	1,297	1,892	2,543	3,266	4,04	4,859	5,445	6,713	3,4272	0,2918
1	0,5	0,000	0,079	0,274	0,499	0,816	1,194	1,621	2,112	2,692	3,306	4,027	3,6708	0,2724
2	1	0,000	0,015	0,256	0,229	0,44	0,733	1,078	1,481	1,949	2,483	3,074	3,7552	0,2663
3	1,5	0,000	0,087	0,224	0,457	0,741	1,068	1,469	1,942	2,466	3,041	3,673	3,8897	0,2571
4	2	0,000	0,076	0,248	0,178	0,341	0,599	0,892	1,248	1,649	2,105	2,661	4,0877	0,2446
5	2,5	0,000	0,072	0,215	0,439	0,72	1,066	1,48	1,899	2,431	3,008	3,615	4,1993	0,2381
6	3	0,000	0,041	0,137	0,351	0,582	0,874	1,239	1,635	2,077	2,598	3,189	4,2461	0,2355
7	3,5	0,000	0,038	0,102	0,289	0,487	0,768	1,028	1,338	1,841	2,328	2,684	4,4088	0,2268
8	4	0,000	0,027	0,094	0,25	0,447	0,712	0,912	1,223	1,568	2,119	2,473	4,5824	0,2182
9	4,5	0,000	0,025	0,94	0,233	0,368	0,673	0,886	1,028	1,381	1,803	2,017	5,2685	0,1898

P3 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları

Katman 1			Katman 2			Katman 3			Katman 4			Katman 5		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-2,36	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,72	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,22	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,81	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,45	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	0,50	mm	δ	1,00	mm	δ	1,50	mm	δ	2,00	mm	δ	2,50	mm
C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm
C(δ)	0,27	mm ³	C(δ)	0,26	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³	C(δ)	0,24	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,12	mm ⁴

Katman 6			Katman 7			Katman 8			Katman 9		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,13	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,17	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,44	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,67	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	3,00	mm	δ	3,50	mm	δ	4,00	mm	δ	4,50	mm
C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm	C(0)	0,29	mm
C(δ)	0,24	mm ³	C(δ)	0,23	mm ³	C(δ)	0,21	mm ³	C(δ)	0,19	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,03	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,05	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,12	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,11	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,10	mm ⁴

Ek 4 P4 Numunesine Ait Ölçüm Sonuçları ve Artık Gerilme Değerleri

P4 Numunesine Ait Sehim, Yarıçap ve Eğrilik Değerleri

#	Genişlik (mm)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	Yarıçap (m)	Eğrilik (1/m)
0	İlk Yüzey	0,000	0,365	0,764	1,218	1,793	2,399	3,067	3,784	4,575	5,488	6,296	3,5361	0,2828
1	0,5	0,000	0,258	0,593	1,072	1,336	1,987	2,571	3,641	4,026	4,872	5,229	3,7776	0,2647
2	1	0,000	0,223	0,412	0,813	1,008	1,713	2,314	2,812	3,336	3,792	4,398	3,8642	0,2588
3	1,5	0,000	0,181	0,336	0,744	0,911	1,236	1,871	2,397	2,811	3,289	3,775	3,9642	0,2523
4	2	0,000	0,153	0,291	0,671	0,805	1,116	1,732	2,102	2,448	3,178	3,670	4,0910	0,2444
5	2,5	0,000	0,111	0,273	0,494	0,767	1,093	1,456	1,848	2,341	2,896	3,455	4,2550	0,2350
6	3	0,000	0,119	0,247	0,467	0,711	1,057	1,388	1,817	2,290	2,795	3,312	4,3295	0,2310
7	3,5	0,000	0,031	0,106	0,268	0,467	0,715	1,028	1,370	1,789	2,233	2,764	4,4360	0,2254
8	4	0,000	0,024	0,088	0,192	0,355	0,579	0,844	1,174	1,542	1,970	2,422	4,7305	0,2114
9	4,5	0,000	0,027	0,072	0,151	0,306	0,475	0,709	1,001	1,338	1,723	2,136	5,3817	0,1858

P4 Numunesine Ait Hesaplama Sonuçları

Katman 1			Katman 2			Katman 3			Katman 4			Katman 5		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-2,32	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,74	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-1,31	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,97	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,66	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	0,50	mm	δ	1,00	mm	δ	1,50	mm	δ	2,00	mm	δ	2,50	mm
C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm
C(δ)	0,27	mm ³	C(δ)	0,26	mm ³	C(δ)	0,25	mm ³	C(δ)	0,24	mm ³	C(δ)	0,24	mm ³
dC(δ)/d δ	-0,02	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²	dC(δ)/d δ	0,00	mm ²	dC(δ)/d δ	0,00	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,13	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴

Katman 6			Katman 7			Katman 8			Katman 9		
	Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim		Değer	Birim
$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,38	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	-0,11	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,14	MPa	$\sigma^{rs}(\delta)$	0,38	MPa
E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa	E	2,00	MPa
H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm	H	8,00	mm
δ	3,00	mm	δ	3,50	mm	δ	4,00	mm	δ	4,50	mm
C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm	C(0)	0,28	mm
C(δ)	0,23	mm ³	C(δ)	0,22	mm ³	C(δ)	0,21	mm ³	C(δ)	0,18	mm ³
dC(δ)/d δ	0,00	mm ²	dC(δ)/d δ	0,00	mm ²	dC(δ)/d δ	0,00	mm ²	dC(δ)/d δ	-0,01	mm ²
$\int C(\xi) d\xi$	0,14	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,15	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,15	mm ⁴	$\int C(\xi) d\xi$	0,16	mm ⁴

Ek 5 Tüm Numunelerdeki Artık Gerilme Sonuçlarının izelgesi

Kaldırılan Katman Kalınlığı (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
P1 (MPa)	-2,45	-1,83	-1,35	-0,92	-0,53	-0,18	0,13	0,40	0,62
P2 (MPa)	-2,48	-1,94	-1,44	-0,98	-0,56	-0,19	0,13	0,40	0,61
P3 (MPa)	-2,37	-1,74	-1,24	-0,82	-0,46	-0,13	0,17	0,44	0,67
P4 (MPa)	-2,32	-1,74	-1,31	-0,97	-0,66	-0,38	-0,11	0,14	0,38

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 17.10.1982

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2000 Pendik Lisesi

Lisans 2000-2004 Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurumlar

2004-2005 Pera Mühendislik Ltd. Şti.
2005-halen ARPEK A.Ş.