

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



LENS'TE
3 FARKLI TOZU
AYNI KATMANA YIĞMA KAFASI
TASARIMI

Ahmet Candemir ÖZDEMİR
Yüksek Lisans Tezi
Tasarım ve İmalat Anabilim Dalı

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LENS'TE
3 FARKLI TOZU
AYNI KATMANA YIĞMA KAFASI
TASARIMI

Ahmet Candemir ÖZDEMİR
Yüksek Lisans Tezi
Tasarım ve İmalat Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

GEBZE
2009

 Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	Yüksek Lisans Jüri Onay Formu
--	---

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından/...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet Candemir ÖZDEMİR'in tez çalışması Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri

Üye (Tez Danışmanı) :	
Üye :	
Üye :	
Üye :	
Üye :	

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri/Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tezin Başlığı : LENS'te 3 Farklı Tozu Aynı Katmana Yığma Kafası Tasarımı

Yazarın Adı : Ahmet Candemir ÖZDEMİR

LENS (Laser Engineered Net Shaping) nozullardan kendi ağırlığı ve hareketini kolaylaştırıcı belirli basınçtaki gazın zorlaması ile akan metal, plastik, vb. tozunu eriterek, bir hat boyunca yığan bir hızlı prototipleme yöntemidir. Prototiplenecek parça önce katmanlandırılır, sonra her katmanda nozulun izleyeceği hat oluşturulur. Elde edilen parçanın fiziksel özellikleri lazer gücü, toz kütle yığma oranı gibi işlem değişkenlerine bağlıdır. Mukavemeti yüksek, tam yoğun parçalar elde edilebilir. Yöntemin en önemli kısıtı, parçanın tek malzeme ile üretilebilmesidir. Tez çalışmasının amacı yöntemi bu kısıdından kurtarabilecek çözümler üretmektir. Farklı özelliklere sahip 3 tozu aynı düzlemde yan yana yığabilecek bir nozul tasarlayabilmek için yığma işlemine etkiyen unsurların, mevcut nozulların ve bu nozulların içinde tozun nasıl hareket ettiğinin bilinmesi gerekir. Tezde bu unsurlardan kısaca söz edilmiş, tasarımı sınırlayan unsurlar genellenerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerden çalışılacak bölgenin, tozun nozuldan çıktığı en son nokta, yani yığma düzlemine en yakın nokta olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Çözümün yaklaşık boyutlarının 1,5 mm çapında, 1 mm yüksekliğinde bir hacim içinde üretilmesi gereği mekanik çözümlerin elenmesine neden olmuştur. Sonuçta nozuldan toz akışını açma - kapama işleminin bir gaz perdesi ile yapılmasına karar verilmiştir. İç içe 2 nozul yerleştirilmiştir. İçteki nozuldan toz akmakta, dış nozuldan perdeyi oluşturacak gaz akmaktadır. İç nozuldaki toz akımı, dış nozuldaki gaz akımı artırılarak durdurulmaktadır. Nozulun tasarımının, gaz perdesinin oluşmasındaki önemi büyüktür. Önce düz uçlu nozullarla, bilgisayar ortamında denemeler yapılmıştır. Düz uçlu nozullarda gaz perdesi oluşmamıştır. Tasarım değiştirilerek şişkin uçlu nozulda gaz perdesi oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar mutlak olmamakla birlikte yöntemin iyileştirmelerle çalışabilirliği görülmüştür.

SUMMARY

Thesis Title : Nozzle Design for LENS to Deposit 3 Different Powder on the Same Plane

Author Name : Ahmet Candemir ÖZDEMİR

LENS (Laser Engineered Net Shaping) is a rapid prototyping method deposits metal, plastic, etc. powder with pressured gas and own weight of powder on a line. First the prototyping part is layered, then lines formed which nozzle follows. The complexity of the part is not important. Physical properties of the prototyping part depends on process variables such as the laser power, mass flow rate. High-strength, fully dense parts can be obtained. The purpose of this thesis produces solutions to eliminate this limit. To design a nozzle which can deposit 3 powder with different properties on same plane and side by side, it must know the factors that effect the deposition, existing nozzles and the behavior of the powder in nozzle. In this thesis, it is briefly mentioned about this factors, the limits of the design was generalized then evaluated. From this evaluations, understood that, the working region must be the last point powder leave from nozzle, means the nearest point to the deposition (substrate) plane. Solution must be produced in the limits in a volume approximately 1.5 mm diameter in size, 1 mm in height. It's eliminate the mechanical solutions. As a result, open - close process of the powder flow from nozzle has been decided to do with a gas curtain. 2 nozzle was placed one inside to other. From the internal nozzle only powder flows, from external nozzle only gas flows to create the gas curtain. The powder flow in the internal nozzle can be stopped by increasing the gas flow in external nozzle. Design of nozzle is important on the formation of gas curtain. First, attempts have been made with flat-ended nozzles in computer environment. Gas curtain is not formed in flat-ended nozzles. By changing design with swollen-ended nozzle gas curtain is formed. The results obtained are not absolute but it's understood that the method is useful with treatments.

TEŞEKKÜRLER

İlham veren Sayın Doç. Dr. Fehmi ERZİNCANLI'ya

Yardımlarını esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Dr. Mehmet ERMURAT' a

Bana her konuda destek olan aileme ve dostlarıma

Bilginin gerçek sahibine

İçindekiler Dizini

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	
ŞEKİLLER DİZİNİ	
TABLOLAR DİZİNİ	
1. LİTERATÜR TARAMA VE AMAÇ	1
2. HIZLI PROTOTİPLEME	5
2.1 Malzeme Ekleyerek Hızlı Prototipleme	5
2.2 Hızlı Prototipleme Yöntemleri	7
2.2.1 SL (Stereo Lithography)	7
2.2.2 SGC (Solid Ground Curing)	8
2.2.3 LOM (Laminated Object Manufacture)	9
2.2.4 SLS (Selective Laser Sintering)	10
2.2.5 3DP (3D Printing)	11
2.2.6 FDM (Fused Deposition Modeling)	12
2.2.7 LENS (Laser Engineered Net Shaping)	12
3. LENS (LASER ENGINEERED NET SHAPING)	14
3.1 Temel İşlem Değişkenleri	18
3.1.1 Lazer gücü	18
3.1.2 Malzemenin spektral soğurması	19
3.1.3 Lazerin nokta çapı	20
3.1.4 Lazerin nokta geçiş hızı	21
3.1.5 Toz kütle yığılma oranı	21
3.1.6 Hat kalınlığı	22
3.1.7 Hat ardışıklığı (dizisi)	22
3.1.8 Alt katman sıcaklığı	23
3.1.9 Soğuma hızı	23

3.1.10 Toz boyutu dağılımı	23
3.1.11 Taşıyıcı gaz hızı	24
3.1.12 Koruyucu gaz hızı	24
3.2 Temel İşlem Değişkenlerinin Birbirileri ile İlişkileri	24
3.2.1 Toz kütle yığma oranı – Taşıyıcı gaz hızı	25
3.2.2 Toz kütle yığma oranı – Koruyucu gaz hızı	25
3.2.3 Toz kütle yığma oranı – Lazerin nokta geçiş hızı	25
3.2.4 Toz kütle yığma oranı – Lazer gücü	27
3.2.5 Lazerin nokta geçiş hızı – Lazer gücü	27
3.3 Temel İşlem Değişkenlerinin Nihai Ürünün Fiziksel Özelliklerine Etkisi	27
4. LENS'TE TOZ YIĞMA DÜZENİ	30
4.1 Toz Besleyici	30
4.2 Toz Dağıtıcı	30
4.3 Nozul	31
4.3.1 Eksensiz (off-axis) nozul	31
4.3.2 Eş eksenli sürekli (continuous coaxial) nozul	31
4.3.3 Eş eksenli süreksiz (discontinuous coaxial) nozul	32
5. EŞ EKSENLİ NOZUL	34
5.1 Eş Eksenli Nozulun Yapısı	34
5.2 Eş Eksenli Nozulda Tozun Davranışı	35
5.2.1 Nozul çıkış ağzının şeklinin toz yığılmasına etkisi	37
5.2.2 Toz çıkış ağzında nozul çapının toz yığılmasına etkisi	37
5.2.3 Nozulun uzaklığının toz yığılmasına etkisi	38
5.2.4 Nozulun eğiminin toz yığılmasına etkisi	39
6. ÇOK MALZEMELİ PROTOTİPLEME	40
6.1 Mevcut LENS Teknolojisinin Sınırları	41
6.1.1 Hat oluşturma	41
6.1.2 Soğuma hızı	42
6.1.3 Toz akışının denetlenmesi	44
6.2 Çok Malzeme Yığabilecek Nozul Tasarımı	44
6.2.1 Tasarım 1	45
6.2.2 Tasarım 2	45
6.2.3 Tasarım 3	46
6.2.4 Tasarım 4	47

6.2.5 Tasarım 5	48
6.2.6 Tasarım 6	49
7. GAZ PERDELİ NOZUL	50
7.1 Gaz Perdesinin Oluşumu	50
7.2 Gaz Perdesinin Oluşabilirliğinin İncelenmesi	51
7.2.1 Düz uçlu nozulda gaz perdesi oluşumu	52
7.2.2 Şişkin uçlu nozulda gaz perdesi oluşumu	54
7.3 Gaz Perdeli Nozulla Toz Besleme	55
8. SONUÇ	57
9. ÖNERİLER	58
10. KAYNAKLAR	59
11. ÖZGEÇMİŞ	64
12. EKLER	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

RP	; Rapid Prototyping
RT	; Rapid Tooling
RM	; Rapid Manufacturing
SFF	; Solid Freeform Fabrication
LM	; Layered Manufacturing
DMLF	; Direct Metal Laser Fabrication
CAD	; Computer Aided Design
CAM	; Computer Aided Manufacturing
LENS	; Laser Engineered Net Shaping
MMLM	; Multi Material Layered Manufacturing
SL	; Stereo Lithography
UV	; Ultraviolet
SGC	; Solid Ground Curing
LOM	; Laminated Object Manufacture
SLS	; Selective Laser Sintering
3DP	; 3D Printing
FDM	; Fused Deposition Modeling
DMD	; Direct Metal Deposition
Nd-YAG	; Neodymium doped Yittria Alumina Garnet
η_a	; Enerji transferi verimi
$E_{soğ}$	; Tozların soğurduğu enerji (J)
P	; Lazer gücü (W, J/s)
t	; Süre (s)

A_p	; Yığılan tozun kesit alanı
η_d	; Yığma verimi
$\dot{V}_p$	; Hacimsel besleme oranı
S	; Lazer nokta geçiş hızı (işlem hızı)
F_D	; Tozu hareket ettiren kuvvet (N)
$F_{\tau p}$	; Sürtünme kuvveti (N)
v_p	; Toz hızı (ms ⁻¹)
v_{pe}	; Toz çıkış hızı (ms ⁻¹)
d_p	; Toz yarıçapı (m)
ρ_p	; Toz yoğunluğu (kgm ⁻³)
v_f	; Serbest düşüş hızı (ms ⁻¹)
v_g	; Gaz hızı (ms ⁻¹)
μ_g	; Gaz vizkozitesi (kgs ⁻¹ m ⁻¹)
ρ_g	; Gaz yoğunluğu (kgm ⁻³)
Q_c	; Gaz akış oranı (m ³ s ⁻¹)
d	; Nozul iç çapı (m)
θ	; Nozul eğimi (°)
C_D	; Sürüklenme katsayısı
C_{Df}	; Serbest düşüş sürüklenme katsayısı
Re	; Reynold sayısı
Ref	; Serbest düşüş Reynold sayısı

λ_p ; Parçacıkların yola bağlı enerji kaybı katsayısı

G ; Yerçekimi ivmesi (ms^{-2})

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Modelin dilimlerinin oluşturulması	6
2.2 Hızlı prototipleme işlemi	6
2.3 SL yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça	8
2.4 SGC yönteminde kürleme	9
2.5 LOM yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça	9
2.6 SLS yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça	10
2.7 3DP yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça	11
2.8 FDM yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek Parça	12
3.1 LENS makinesinin şematik gösterimi	15
3.2 LENS ile parça onarma	16
3.3 LENS'te 5 eksenli düzeneikle parça imalatı	16
3.4 LENS'te alaşımlandırılmış parça ve alaşımlandırma düzeneği	17
3.5 LENS'te A malzemesinin üstüne B malzemesini yığma	17
3.6 LENS ile hızlı prototipleme aşamaları	18
3.7 LENS'in lazer düzeneği	19
3.8 Lazer enerjisinin değişiminin aynı miktardaki toza etkisi	19
3.9 Çeşitli malzemelerin farklı dalga boylarındaki lazeri yansıtması	20
3.10 Lazer ışın demeti çapının hat kalınlığına etkisi	20
3.11 Yığılan toz kütle miktarı ile parça yüksekliği arasındaki ilişki	21
3.12 Lazer gücü ile hat kalınlığının değişimi	22
3.13 İzlenen hatlar ne kadar yakınsa parçanın doğruluğu o kadar yüksektir	22
3.14 2,5 m/s ilerleme hızında parça üzerinde sıcaklık dağılımı	23

3.15 Toz yığma işlemi	24
3.16 Hacimsel dağılım kesiri	26
3.17 A:östenit (açık mavi); M:martenzit (koyu mavi)	28
4.1 LENS'te toz besleme düzeneği	30
4.2 Toz dağıtıcı (splitter)	30
4.3 Eksensiz (off-axis) toz püskürtme	31
4.4 Eşeksenli sürekli toz püskürtme	32
4.5 Eşeksenli sürekli toz püskürtme kesidi	32
4.6 Eş eksenli süreksiz toz püskürtme	32
4.7 Eş eksenli süreksiz toz püskürtme kesidi	33
5.1 Eş eksenli toz püskürtmede nozulun genel yapısı	34
5.2 Sürekli (solda) ve süreksiz (sağda) toz püskürtme nozulu kesitleri	34
5.3 Tozun akışına etkiyen kuvvetler	35
5.4 Nozul çıkış ağzına göre toz yoğunluğunun değişimi	37
5.5 Nozul kesit çapının toz yığılmasına etkisi	38
5.6 Nozulun zeminden uzaklığının toz yığılmasına etkisi	38
5.7 Toz besleme açısının yığılmaya etkisi	39
6.1 LENS yöntemi ile yan yana yığılmış iki farklı malzeme	40
6.2 Oyuncak bir otomobilin STL dosyası	41
6.3 Çok malzemeli bir oyuncak otomobilin katmanlandırılması	42
6.4 Yan yana yığılmış 3 farklı toz için hat	42
6.5 AISI 420 çelik için işlem hızına göre yığılan katmandaki ısı birikiminin sıcaklığa etkisi	43
6.6 Nikel ve porselen tozlarının yan yana yığılması sırasında sıcaklığın dağılımı	43
6.7 İlk tasarlanan nozul (Tasarım 1)	45

6.8 Tasarlanan ikinci nozul (Tasarım 2)	46
6.9 Tasarlanan üçüncü nozul (Tasarım 3)	47
6.10 Tasarlanan dördüncü nozul (Tasarım 4)	47
6.11 Tasarlanan beşinci nozul (Tasarım 5)	45
6.12 Vakum pompası	49
7.1 Gaz Perdeli Nozul'un yapısı	50
7.2 Gaz perdesinin oluşumu	51
7.3 Düz uçlu nozul	52
7.4 İç ve dış nozuldan birim zamanda akan kütleler eşit (15 g/sn)	53
7.5 Dış nozuldan birim zamanda akan kütle, iç nozuldan birim zamanda akan kütlenin 10 katıdır (150 g/sn)	53
7.6 Şişkin uçlu nozul	54
7.7 İç nozulda gaz perdesinin oluşması	55
7.8 A, B ve C tozları için 3'erli gruplar halinde paylaştırılmış nozullar	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

3.1 LENS'in temel işlem değişkenleri ve etki ettikleri fiziksel özellikler

25

1. LİTERATÜR TARAMA VE AMAÇ

Hızlı prototipleme (Rapid Prototyping (RP)) teknolojileri ürün geliştirme süresini ve maliyetini azaltmak için geliştirilmiş imalat yöntemleridir. Bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirilmiş bir parçanın görsel, fiziksel yeterliliğini canlı olarak görebilmek, elle tutabilmek, işlevsel testlerini [1] yapabilmek, hızlı işleme (Rapid Tooling (RT)) de ana modeli ya da kalıbını üretebilmek için kullanılmaktadırlar [2]. Katı serbest şekil imalat (Solid freeform fabrication (SFF)) yöntemleri olarak da bilinen bu yöntemler özellikle son yirmi yılda hızlı bir gelişme göstermiştir.

Katmanlandırılmış İmalat (Layered Manufacturing (LM)) tekniği olarak da adlandırılan yöntemin asıl amacı tam yoğun (fully dense) ve kullanıma hazır nihai şeklinde metal parçaları tek adımda imal etmeyi başarmaktır [2]. Lazerle Doğrudan Metal İmalatı (Direct Metal Laser Fabrication (DMLF)) işlemleri ile neredeyse tam yoğunluklu ve nihai şeklinde metal parçalar CAD verilerinden, geleneksel imalat yöntemlerini kullanmadan ya da ikinci bir işleme gerek kalmadan üretilmektedirler.

Hızlı prototipleme yöntemlerindeki gelişmeler hızlı işleme (Rapid Tooling (RT)) ve hızlı imalat (Rapid Manufacturing (RM)) yöntemlerinin gelişimini de beraberinde getirmiştir. Hızlı işleme yöntemi; iyi yüzey ve boyutsal doğrulukla parça üretebilen hızlı prototipleme yöntemlerinde düşük erime sıcaklığına sahip malzemelerin kullanılması ile model üretimidir [3]. Buradaki hızlı ifadesi de hızlı prototipleme ile model elde edildiği için kullanılmaktadır [4], bu modellerle daha sonra kalıp üretilmektedir. Hızlı imalat yöntemi; sağlam ve dayanıklı malzemelerden prototip üretimidir, bu prototip herhangi makinenin işlevsel bir parçası olarak kullanılabilir [5].

Hızlı prototipleme (Rapid Prototyping) birçok şekilde isimlendirilmektedir [6]:

- Katmanlandırılmış imalat (Layered Manufacturing (LM)),
- Katı serbest şekil imalat (Solid freeform fabrication (SFF)),
- CAD'den imalat (Direct CAD manufacturing),

- Hızlı prototipleme ve imalat (Rapid prototyping and manufacturing (RPM))

Kullanılan malzemenin cinsine göre 3'e ayrılırlar [7,8]:

- Sıvı esaslı (stereolitrografi (stereolitrography), katı telvesini kürleme (solid ground curing), damlatarak yığma (droplet deposition manufacturing), balistik parçacıkla imalat (ballistic particle manufacturing))

- Katı esaslı (tabakalandırarak imal etme (laminated object manufacturing), eriterek yığma (fused deposition modeling), ultrasonik pekiştirme (ultrasonic consolidation)),

- Toz esaslı (seçici lazer sinterleme (selective laser sintering), 3 boyutlu yazma (three dimensional printing), lazerle nihai şekil verme (laser engineered net shaping))

Toz malzemedan ürün elde etme yöntemlerinden olan Laser Engineered Net Shaping (LENS) ile parça, tozlar eritilerek oluşturulur. Elde edilen parçanın mekanik özellikleri oldukça iyidir [9, 10]. Örneğin; LENS'te üretilen Ti 6-4 alaşım çeliğinden parçanın soğuma hızı yüksek ($\sim 1000^\circ \text{C/s}$) olmasına rağmen en yüksek mukavemet (1068 MPa), sünme mukavemeti (944 MPa) ve % uzama (% 11) değerleri ASTM (en yüksek mukavemet 860 Mpa, sünme mukavemeti 795 MPa ve % uzama 8-10) standartlarının üzerindedir [11]. Her malzemenin fiziksel özellikleri geçirdiği işlemler nispetinde, kullanıldığı yere göre iyi ya da kötüdür. Malzemenin fiziksel özelliklerini alaşımı, soğuma hızı, soğumaya başladığı sıcaklık, vb. belirler [12].

Laser Engineered Net Shaping'de (LENS) sağlıklı bir parçanın elde edilmesini, elde edilen parçanın fiziksel özelliklerini işlem değişkenleri belirler [13, 14]. İşlem değişkenlerinin sayısı arttırılabilirse de lazer gücü (W), akan toz miktarı (g/s), işlem hızı (m/s), nozul yüksekliği (mm) başlıca doğrudan denetlenebilen işlem değişkenleridir. Çalışmalar genelde bu 4 değişken üzerinde yoğunlaştırılmış, 3 değişken sabit tutularak birinin değişiminin parça özelliklerine etkisi incelenmiştir [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Yöntemde petrol türevi malzemelerden, paslanmaz çelik (304L, 316, 309, 17-4), maraging çelikleri (M300), nikel esaslı süper alaşımlar (625, 600, 718, 690), takım çelikleri (H13), titanyum alaşımları (6Al-4 V) gibi özel malzemelere kadar geniş bir yelpazede bir çok malzeme ile çalışılabilmektedir [24, 25, 26, 27]. Farklı malzemedan bir katman üzerine farklı bir malzeme yığılabilmekte [28, 29, 30], işlemler sırasında malzemenin alaşımı değiştirilebilmektedir [31, 32, 33]. Örneğin askeri amaçlı bir uygulamada Al-4Cu-

1Mg alaşımlı malzemenin ısı iletkenliğini arttırmak için üzerine lazerle 80Cu–20Mo kaplama uygulanmıştır [34]. Malzeme $667\pm 2,5$ μm kalınlığındaki kaplama ile % 86 oranında ısı geçirgenlik kazanmıştır. Başka bir çalışmada A malzemesinin yanına ya da üzerine B malzemesini sağlıklı bir şekilde yığmak için izlenmesi gereken yol, dikkat edilmesi gereken hususlar basitleştirilerek ifade edilmiştir ve işlem değişkenlerinin eriyik şekline etkileri belirtilmiştir [35]. Alaşım tozlarının yığılmasında sıcaklığa bağlı olarak mikro yapıdaki değişimler incelenmiştir [36]. Toz yerine 2 farklı malzemeli tel ($0,4572\times 0,7112$ mm² Inconel 718, $0,127\times 0,7112$ mm² Ti-6-4) kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada farklı malzemelerin yan yana yığılmasında ortaya çıkabilecek sorunlar, özellikle ısı gerilmelerin neden olduğu hasarlar incelenmiştir[37].

Toz yığma işlemini gerçekleştirebilmek için birkaç farklı nozul düzeneği geliştirilmiştir [38]. Nozul yapısının [39] ve yığma yönü (daha çok eksensiz (off-axis) nozullarda) ile işlem yönünün [40] yığmaya etkileri incelenmiştir. Hat yüksekliğinin ve genişliğinin hızlı prototipleme işleminin başarı ile sonuçlandırılmasında en önemli etken olduğu belirtilmiş, lazer gücünün, lazer ışın demeti çapının ve işlem hızının etkisinin hat kesitine etkileri açıklanmaya çalışılmıştır [41, 42, 43]. Hat yüksekliğine soğuma zamanının uzunluğunun ya da ısı kaybetme hızının düşük olmasının nasıl etkidiği açıklanarak, elde edilen parçanın boyutsal doğruluğunun nasıl sağlanabileceği ve yüzey kalitesinin nasıl iyileştirilebileceği ortaya konmuştur [44, 45, 46, 47]. Lazer gücü, toz akış ya da işlem hızı değişikliklerine rağmen, lazer ışınlarının azda olsa yansımaları da hesaba katarak, nozuldan belirli bir uzaklıkta tutarlı, neredeyse sabit bir hat yüksekliği elde edilmesini sağlayacak yöntemler önerilmiştir [48, 49, 50]. En iyi yığma değişkenlerini analitik ve nümerik olarak inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir [50, 51]. Bununla ilişkilendirilebilecek şekilde oksidasyonun ve toz yapışmasının yüzey kalitesine etkisi incelenmiş, ayrıca yığma işlemi sırasında aşağıdaki gibi 4 durumda gerçekleştiği belirtilmiştir [40]:

- katı toz katı yüzeyden seker,
- katı toz sıvı yüzeye yapışır,
- sıvı toz sıvı yüzeye yapışır,
- sıvı toz katı yüzeye yapışır.

Başka bir çalışmada toz şeklinin ve boyutlarının yığmaya, yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir [52, 53]. Isıl gerilmelerin yığmaya etkileri ve sonuçların nasıl iyileştirilebileceği ile ilgili değerlendirmelerde bulunulmuştur [54].

Literatür taramaları sırasında teze konu, aynı anda birden fazla tozla çalışmaya müsaade eden, tozun akmasına nozulun çıkış ucuna en yakın noktada müdahale edebilen bir yöntemin geliştirilmesini konu edinen bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Ancak böyle bir yöntemde izlenmesi gereken yolu modellemeye yönelik bilgisayar programları geliştirilmeye çalışılmış [55], bu tür yöntemlerin denetlenebilmesi için bazı önerilerde bulunulmuştur [56]. Çok malzemeli tabakalandırılmış imalat (multi-material layered manufacturing (MMLM)) olarak adlandırılan yöntemde parçaları birbirinden farklı 7 malzemeden oluşan oyuncak bir otomobilin bilgisayar ortamında, hızlı prototipleme yöntemi ile nasıl üretilebileceği tarif edilmiştir. Nozulla ilgili olmamakla birlikte tez çalışmasının önemini açıklayabilecek önemli çalışmalardan biri de, bir tür kalıplama yöntemi sayılabilecek, ancak kalıp olarak kullanılan parçanın da ürünün bütününe ait olduğu Şekle Yığarak İmalat (Shape Deposition Manufacturing) yönteminden türetilen bir yöntem üzerine yapılan çalışmalar olabilir [57]. Burada 316L paslanmaz çelik malzemeden enjeksiyon kalıbının hızlı soğuması için kullanılan bakır, kalıp içindeki boşluğa lazerle yığılmıştır.

Tez çalışmasının amacı; LENS ile yapılan prototipleme işlemlerinde birden fazla tozla çalışabilme, çok malzemeli ürünler üretebilme esnekliği kazanmaktır. Bu amaç doğrultusunda, toza nozulun toz çıkma ucuna en yakın noktada müdahale edilmesine olanak veren, yeni bir nozul tasarımı gerçekleştirilmiştir.

2.HIZLI PROTOTİPLEME

Tasarımcı yeni bir ürün tasarladığı, var olan ürün tasarımını ya da üründeki işlevsel bir parçanın tasarımını iyileştirmek istediği zaman tasarımın fiziksel bir modelini görmek ister. Çünkü:

- Tasarımda yapılması gereken değişikliklerin algılanmasında bilgisayar ortamındaki bir model görsel olarak gerçek bir model kadar etkili değildir.
- Tasarımın ergonomisinin iyileştirilebilmesi için mutlaka gerçek, elle tutulabilir, hissedilebilir bir model kullanılmalıdır.

Herhangi bir ürünün modelini elde etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Hızlı prototipleme yöntemleri olarak bilinen bu yöntemler 2 ana sınıfta toplanabilirler;

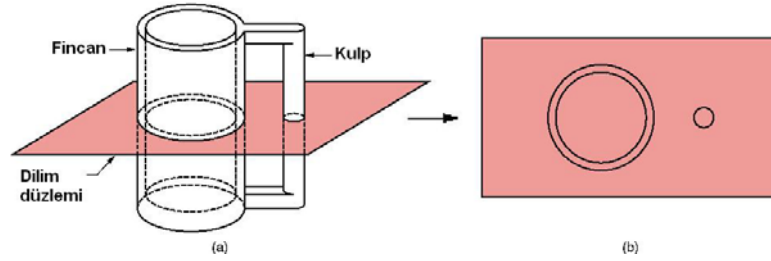
- Malzeme uzaklaştırarak hızlı prototipleme yöntemleri: Küçük parçaların modellerinin üretiminde kullanılırlar. Model malzemesi genellikle kolay işlenebilen, eritilip katılaştırılabilen mum ya da parafin (wax) benzeri bir malzemedir. Malzeme üzerinden el aletleri ile ya da CNC makinelerde talaş kaldırılarak model oluşturulur.
- Malzeme ekleyerek hızlı prototipleme yöntemleri: Modelin katmanlandırılarak oluşturulduğu yöntemlerdir. Parça belirli sayıdaki katmana bölünür, yapı taşlarının üst üste, yan yana birbirine bağlanması ile elde edilir.

2.1 Malzeme Ekleyerek Hızlı Prototipleme

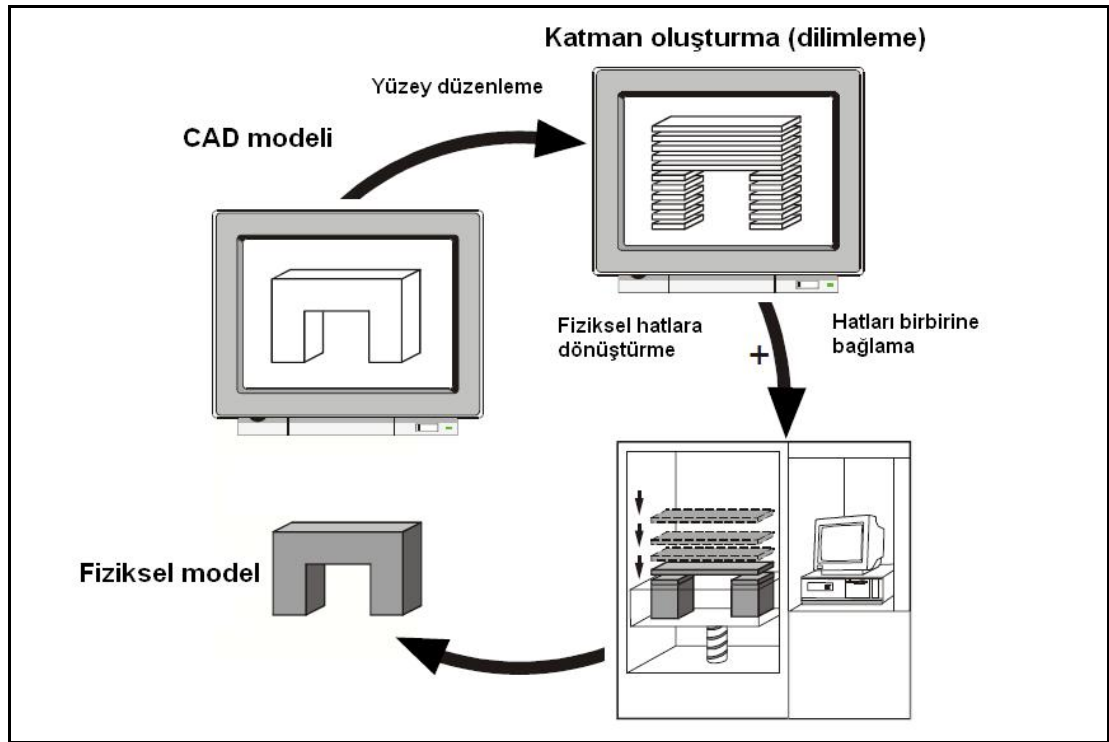
Hızlı prototipleme genellikle mühendislik uygulamalarında, bilgisayar ortamında tasarlanan bir parçanın örneğinin üretilmesi için kullanılır. Prototipin elde edilme süresi parçanın karmaşıklığına, kullanılan malzemeye ve prototipleme yöntemine göre birkaç saat ya da gün sürebilmektedir. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın prototiplenecek parçanın katman katman bölünmesi, dilimlenmesi gerekir. Prototipin üretimi için gerekli katman kesidi verilerinin oluşturulması aşağıdaki gibi genellenebilir (Şekil 2.1, Şekil 2.2);

- Parçanın CAD modeli oluşturulur,

- CAD modelinin yüzeyleri bilgisayar ortamında çok küçük üçgenler ya da çokgenler halinde yeniden düzenlenir,
- Model yatay, kapalı düzlemler halinde dilimlenir.



Şekil 2.1 Modelin dilimlerinin oluşturulması [7].



Şekil 2.2 Hızlı prototipleme işlemi [58].

Her katmanın inşası ayrı ayrı gerçekleştirilir. Hem katmanın inşasında kullanılan malzemeye, hem de malzemeleri ve katmanları birbirine bağlayan bağlara göre hızlı prototipleme için birçok sınıflandırma yapılabilirse de en yaygın sınıflandırma kullanılan malzemenin fiziksel şekline göre yapılanıdır:

- Sıvı esaslı: Genellikle katman katman kürlenerek katlaşıp, birbirine bağlanabilen sıvı polimerler kullanılır. Sıvılaştırılan malzemeler ve bu

malzemeleri bağlamak için kullanılan yöntemler farklıdır. En çok bilinen uygulamalar stereolitrografi (stereolitrography), katı telvesini kürleme (solid ground curing), damlatarak yığma (droplet deposition manufacturing) ve balistik parçacıkla imalattır (ballistic particle manufacturing).

- Toz esaslı: Genellikle katman katman yığılarak birbirine bağlanabilen tozlar kullanılır. Tozları bağlamak için kullanılan yöntemler farklıdır. En çok bilinen uygulamalar seçici lazer sinterleme (selective laser sintering), 3 boyutlu yazma (three dimensional printing), lazerle nihai şekil vermedir (laser engineered net shaping).

- Katı esaslı: Genellikle katman katman birbirine bağlanan, levhadan kesilmiş katı dilimler kullanılır. Levhalar karton, plastik ya da metal gibi bir malzemeden olabilir. En çok bilinen uygulamalar tabakalandırarak imal etme (laminated object manufacturing), eriterek yığma (fused deposition modeling), ultrasonik pekiştirmedir (ultrasonic consolidation).

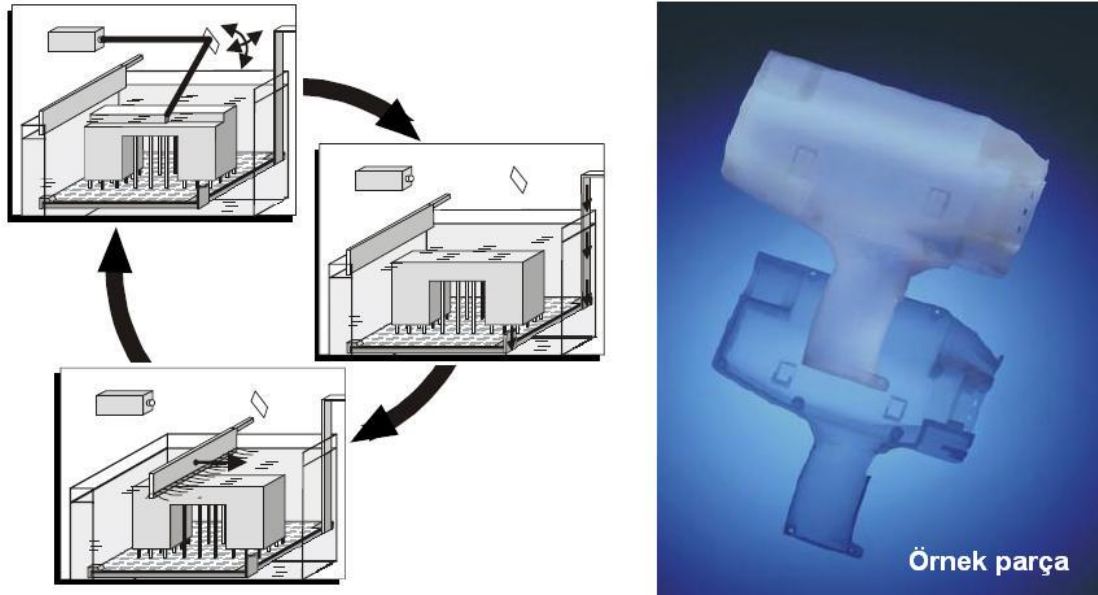
2.2 Hızlı Prototipleme Yöntemleri

Hızlı prototiplemede herhangi bir parça yapı taşlarının alt alta, yan yana birbirine bağlanması ile elde edilir. Yapı taşlarına, yapı taşlarını birbirine bağlayan “bağların” türüne ve bu bağları oluşturma şekline göre farklı yöntemler uygulanır. Bu bölümde en çok kullanılanları tanıtılacaktır.

2.2.1 SL (Stereo Lithography)

En yaygın hızlı prototipleme teknolojisidir. Sıvı esaslıdır. Polimer oluşturan ışığa duyarlı reçine monomerleri ultraviyole ışınları ile sertleşir. Tepkime sadece yüzeyde, ışının geçtiği hatta gerçekleşir. Sertleşen bölgesin kesidi yarım çember şeklindedir. Bir SL makinesi sıvı teknesi içindeki bir platformdan ve UV (ultraviolet) ışınların temin edildiği helyum-kadmiyum ya da argon lazerinden oluşur (Şekil 2.3). CAD modelinden elde edilen katmanlar teker teker oluşturulur. Platform her defasında bir katman yüksekliği kadar tekne içindeki reçineye daldırılır. Reçinenin platform üzerine eşit dağılması için bir bıçak kullanılır. Bu bıçak platform boyunca

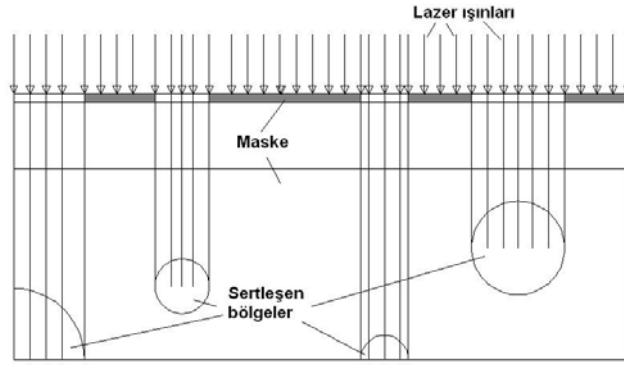
hareket eder ve reçineyi platforma sıvar. Sıvama işlemi bittikten sonra UV ışınları o katmandaki parça kesidi sınırları içinde bilgisayarda oluşturulan hattı takip eder. Üzerinden UV ışını geçen hat üzerindeki sıvı reçine sertleşir. Birinci katman bitince ikinci katmanı oluşturmak üzere platform tekne içine bir katman yüksekliğince daldırılır. Bir önceki katmanın oluşturulması için gerçekleştirilen işlemler tekrarlanır. Parçanın altında boşluk olan bölgeleri için parçadan uzaklaştırılabilecek destekler kullanılır. Tüm katmanlar bitince parça tamamlanmış olur, platform yükseltilerek parça reçine içinden çıkartılır. Parça üzerindeki fazla sıvı reçinenin süzülmesi beklenir, sonra kullanılabilir.



Şekil 2.3 SL yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça [58].

2.2.2 SGC (Solid Ground Curing)

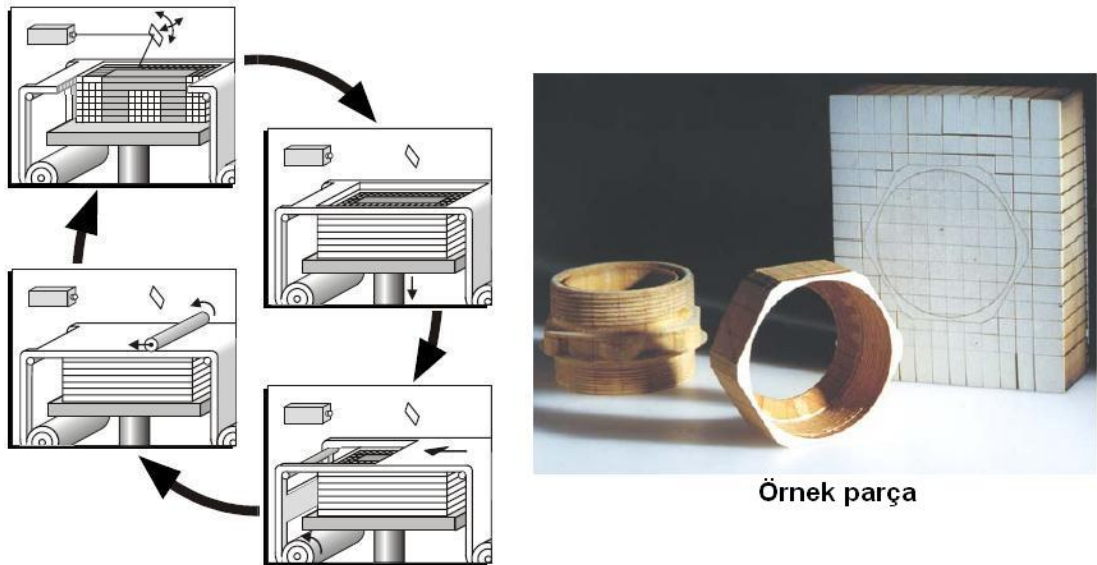
SL benzeri bir yöntemdir. Sıvı esastır. SL'den farklı olarak kürleme için daha yüksek enerjiler kullanılabilir. Çünkü kürlemenin gerçekleşeceği her katman için bir maske hazırlanır. Maske kürlenecek katmanda, kürlenmeyecek bölgeleri kapatmak için kullanılır (Şekil 2.4). Kürlenmeyen sıvı fotopolimer vakumla alınır. Boşluklar daha sonra basınçlı sıcak su ile uzaklaştırılabilecek bir mumla doldurulur. Parçaya destek olan bu mumun en önemli katkısı içinde boşluk olan parçalarında imal edilebilmesini sağlamasıdır. Hem SL, hem de SGC yöntemleri uzun işlem süreleri gerektirir. Reçinenin türüne göre soğuma süresi 12 saati bulabilir.



Şekil 2.4 SGC yönteminde kütleme.

2.2.3 LOM (Laminated Object Manufacture)

Genellikle yapı taşı olarak kağıt, plastik, seramik takviyeli fiber, vb. kullanılır. Katı esastır. Makine bir platformdan, yapı taşının sarılı olduğu ruloların takıldığı millerden, yapıştırıcıyı yüzeye yaymak için kullanılan bir silindirden ve CO₂ lazerinden oluşur (Şekil 2.5). Yapışkan sürülen yüzeye serilen yapıtaşı, o katmandaki kesitin sınırları boyunca lazer tarafından kesilir. Kesilen katman üzerine yapıştırıcı sürülür, tekrar yapıtaşı serilir. Yapıştırıcıyı yüzeye yayan silindir iyi bir yapışma sağlamak için genellikle sıcaktır. Yapıtaşı yeni katmandaki kesitin sınırları boyunca lazer tarafından kesilir. Parça elde edilinceye kadar işlemler tekrarlanır.

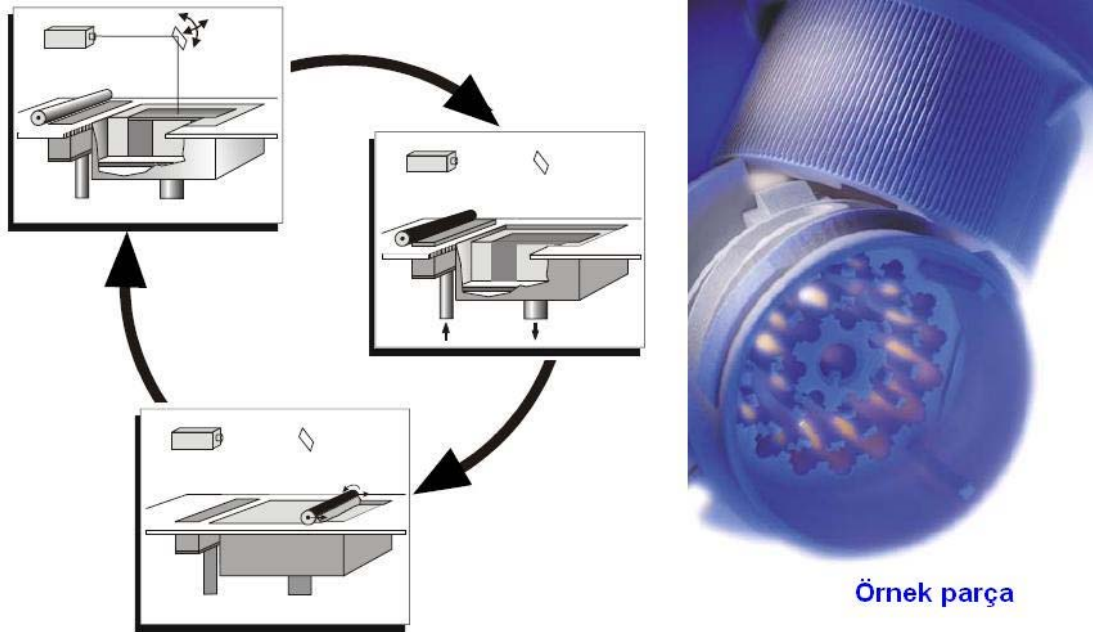


Şekil 2.5 LOM yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça [58].

LOM diğer yöntemlerden 5-10 kat daha hızlıdır. Ancak yüzey kalitesi kötüdür. Örneğin dairesel bir kesit oluşturulmak istendiğinde yapıtaşının yüksekliği kadar köşeler oluşabilmektedir. Makinedeki işlemler bittikten sonra zımparalama gibi bir işlem gerekebilmektedir. İçi boş parçaların imal edilmesi de güçtür, kesme sırasında ve parçayı uzaklaştırırken, kesilen parçanın boşluğa düşüp parça içinde sıkışması gibi sorunlar yaşanabilmektedir.

2.2.4 SLS (Selective Laser Sintering)

Yapıtaşı olarak toz kullanılır. Makine parçanın imalatında kullanılacak tozun bulunduğu bir hazneden, üzerinde parçanın imal edildiği bir platformdan, tozu platform üzerine yayan bir silindirden ve CO₂ lazerinden oluşur (Şekil 2.6). Toz haznesi işlenecek katmandaki tozu sağlayacak kadar yükseltilir. Silindir tozu katmana yayar. Lazer katmandaki parça kesidini tarayarak tozun eriyip, bağlanmasını sağlar. Makinenin tablası bir katman kalınlığı kadar aşağı iner, toz haznesi yükseltilerek bir önceki katmanın üzerine toz yayılır. Yeni katman da lazer ışını ile taranır. Her defasında parçanın yalnızca o katmandaki kesiti taranır. Tüm parça elde edilinceye kadar bu işlem devam eder.

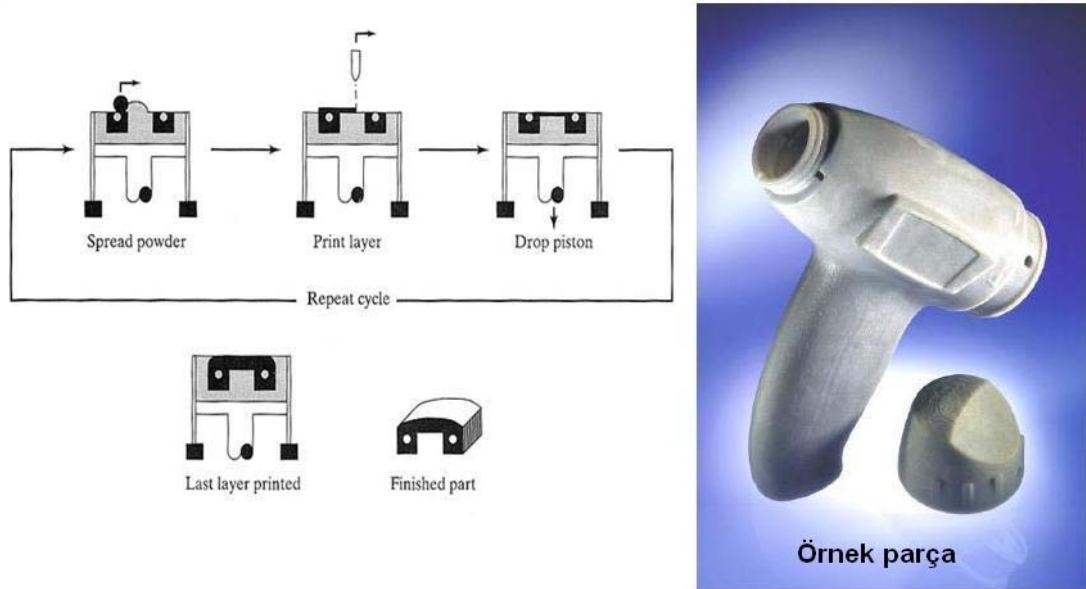


Şekil 2.6 SLS yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça [58].

SLS yönteminde naylon, naylon kompozitleri, kum, reçine, metal ve polikarbon malzemelerle çalışılabilir. %100 yoğunlukta parçalar elde edilebilir. 0,5 mm ile 0,7 mm kalınlıkta duvarlar oluşturulabilir. Ancak, özellikle metallerin eritilmesi için yüksek sıcaklıklar gerektiğinden ısıнын etkisi ile çarpılmalar olabileceğinden parçanın soğutulma ihtiyacı vardır.

2.2.5 3DP (3D Printing)

3DP makinesi tutkal püskürten bir nozuldan, parçanın imalatında kullanılacak tozun bulunduğu bir haznedan, üzerinde parçanın imal edildiği bir platformdan ve tozu platform üzerine yayan bir silindirden oluşmaktadır (Şekil 2.7). Makinenin tablasının üzerine bir katman yüksekliğince toz serilir. Toz katmanı üzerine, o katmandaki kesidin alanını kaplayacak şekilde yapıştırıcı püskürtülür. Yapıştırıcı püskürtülen katman üzerine bir kat daha toz serilir. Sadece yapışkanın püskürtüldüğü bölgelerdeki tozlar birbirine yapışır. Parça elde edilinceye kadar bu işlem devam eder.



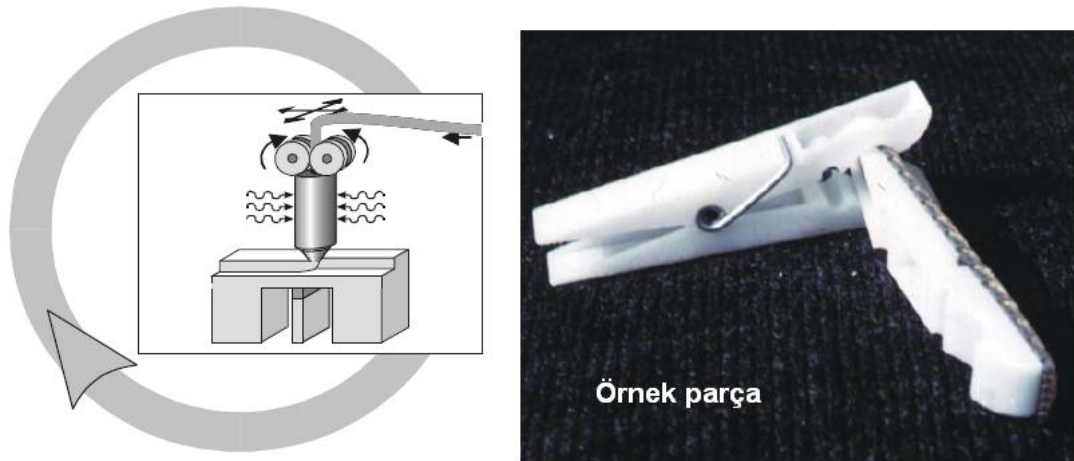
Şekil 2.7 3DP yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça [58].

Makinede işlemler bittikten sonra yoğunluğunu arttırmak için parça sıkıştırılabilir. Sıkıştırıldığı durumda parça yoğunluğu %99'a kadar arttırılabilir.

Parçanın mukavemet kazanması için bir fırında yaklaşık 900 °C’de pişirilmesi gerekir. Elde edilen parçalar gözenekli, kolay kırılabilir. Parçanın şekline göre bazı bölgelerdeki atık tozlar uzaklaştırılamayabilir.

2.2.6 FDM (Fused Deposition Modeling)

Makine bir platformdan ve yapıtaşıyı yüzeye eriterek püskürten bir nozuldan oluşur (Şekil 2.8). Belirli bir katmana parça kesitince yapıtaşıyı püskürtülmesi tamamlanınca tabla katman kalınlığı kadar aşağı iner ve işlem parça bitinceye kadar devam eder. Yapıtaşı olarak termoplastik bir malzeme kullanılır ve nozulda eritilerek katmana püskürtülür.



Şekil 2.8 FDM yönteminin şematik gösterimi ve bu yöntemle elde edilmiş örnek parça [58].

Elde edilen parçanın mekanik özellikleri iyidir. Yöntemle çok renkli parçalar elde edilebilir. Ancak elde edilen parçanın tüm detayları oluşturulamamış olabilir ve kullanılan hammadde pahalıdır.

2.2.7 LENS (Laser Engineered Net Shaping)

LENS; nozullardan püskürtülen tozların lazer ışını ile eritilerek parçanın o katmandaki kesiti boyunca yan yana örülmesi esasına dayanır. Katman bitince

makinenin tablası bir katman yüksekliği boyunca aşağı iner, yeni katman örölür ve parça elde edilinceye kadar işlem tekrarlanır. LENS ile elde edilen parçalar doğrudan bir makinenin parçası olarak kullanılabilirler. Yöntem ayrıca bazı onarım işlemlerinde de kullanılabilir. Ayrıntılı bilgi 3. bölümde verilmiştir.

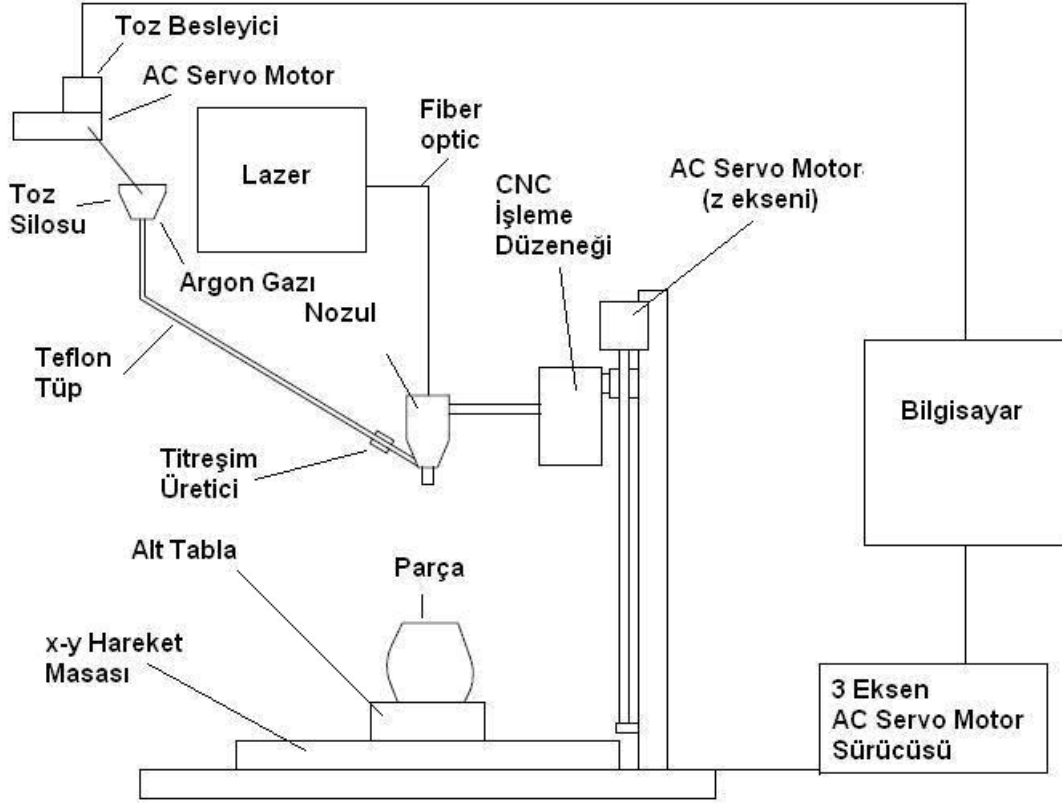
3. LENS (Laser Engineered Net Shaping)

Hızlı prototipleme yöntemleri herhangi bir parçanın ikinci bir işleme gerek kalmadan elde edilebildiği önemli imalat yöntemlerindendirler. Bu yöntemlerden biri olan LENS (Laser Engineered Net Shaping) hem uygulama kolaylığı sağlaması, hem de üretilen parçanın bir makinenin işlevsel bir parçası olarak kullanılabilmesi nedeni ile diğer yöntemlerden daha fazla önem kazanmaktadır.

Uzay ve savunma sanayi, endüstri, biyomedikal, elektronik uygulamaları için Sandia Ulusal Laboratuvarları tarafından geliştirilmiş ve Optomec firması tarafından ticari bir ürün haline dönüştürülmüştür. Yüksek güçlü bir lazerle metal tozları eritilerek tabla üzerine yığılırlar. Metal tozları, erimenin gerçekleştiği lazerin odak noktasına nozullardan bir gaz yardımı ile püskürtülürler. Bu gaz aynı zamanda eriyik bölgesini atmosferdeki gazların olumsuz etkilerinden korumak için de kullanılır. İşlem bir oda içinde gerçekleştirilir. Hem parça atmosferin olumsuz etkilerinden korunur, hem de operatör tozdan ve lazer ışınının olumsuz etkilerinden korunur. Lazerin gücü çok geniş bir aralıkta, 100 W'tan 20 kW'tan daha yüksek güçlere kadar değişebilir. Tam yoğun (fully dense) şekiller elde edilebilir. Kapalı devre kontrolle parça kusursuz bir şekilde elde edilir. Hız, uzaklık, toz miktarı, lazer gücü gibi yığma parametreleri değiştirilebilir. 3, 4 ve 5 eksen çalışılabilir. Elde edilen parçaların mekanik özellikleri geleneksel yöntemlerle üretilenlerden daha iyidir.

LENS, doğrudan metal yığma (direct metal deposition (DMD)) ya da serbest şekil katı imalatı (solid freeform fabrication (SFF)) teknolojisi olarak ta bilinir [20]. Metal tozları kullanılarak karmaşık, 3 boyutlu parçalar katman katman imal edilirler. Çok yönlü, geliştirilmeye müsait bir bilgisayar destekli imalat (computer aided manufacturing (CAM)) teknolojisidir. Yöntem ile bilgisayar desteği ile tasarlanmış (computer aided design (CAD)) bir parça birkaç saat içinde imal edilebilir. Proseste tozları eritmek için gerekli enerji Nd-YAG (Neodymium doped Yittria Alumina Garnet) katı hal lazerinden sağlanır. Makine; CNC kontrollü bir platformdan, tozu beslemek için kullanılan nozullardan ve lazerden oluşur (Şekil 3.1). Yığılacak malzemenin mikron ölçeklerdeki tanecikleri çeşitli sayıdaki ve belirli bir noktaya

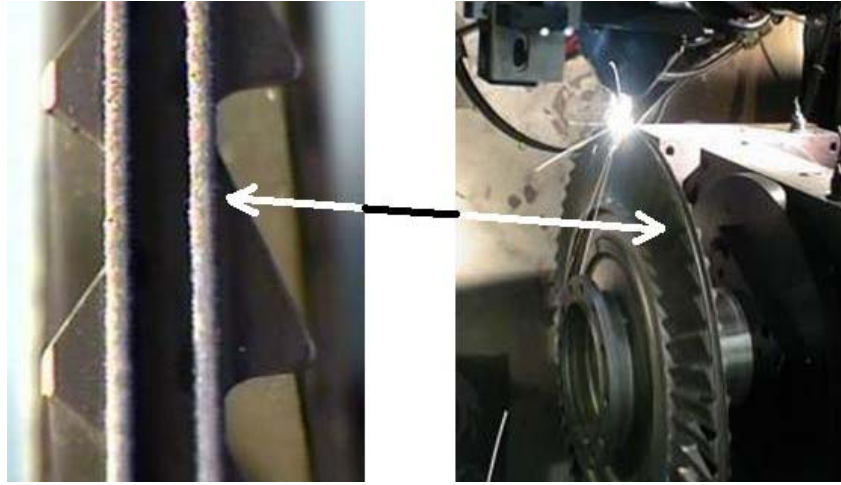
odaklanmış kanallardan akarken, aynı noktaya odaklanmış CO₂, Nd-YAG gibi bir lazerin ışın demeti ile yığma yüzeyi üzerinde eritilirler



Şekil 3.1 LENS makinesinin şematik gösterimi [59].

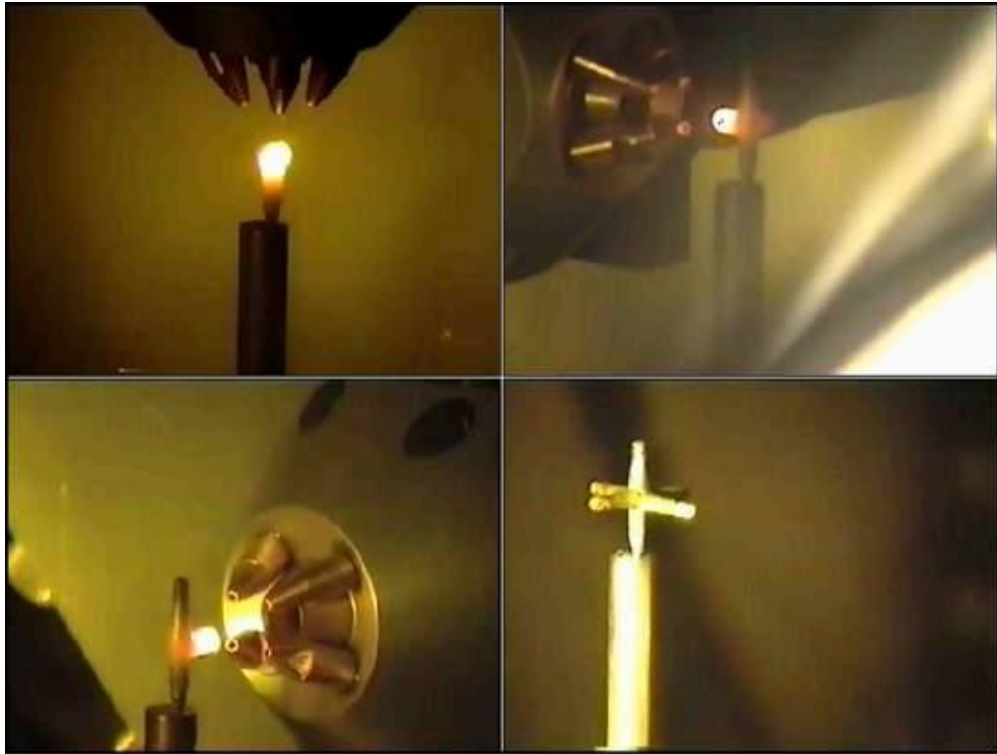
LENS'te (Laser Engineered Net Shaping) plastikten alüminyuma, paslanmaz çelikten titanyuma çok sayıda malzeme ile çalışabilme olanağı vardır. Diğer yöntemlere göre en önemli üstünlüğü yüksek yoğunluklu parçaların elde edilebilmesidir. İşlemin zaman, hız, sıcaklık, nozul yüksekliği, akan toz miktarı gibi işlem değişkenlerinin uygun değerlere ayarlanması durumunda elde edilen parçanın tane yapısı, yüzey kalitesi gibi fiziksel özellikleri çok iyi olabilmektedir. Yapılan çalışmalar ile yöntemde çok önemli gelişmeler sağlanmıştır. Geniş bir malzeme yelpazesi ile çalışılabilme olanağı bulunmaktadır. Biblo türü süs eşyalarının üretiminden uzay mekiği parçalarının üretimine kadar birçok yerde kullanım alanı bulmuştur. Yeniden üretim maliyetleri yüksek olan parçaların onarımında dahi kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Geliştirilen 3, 4 ve 5 eksenli düzeneklerle karmaşık parçaların imalatı, onarımı rahatlıkla yapılabilir (Şekil 3.3). Elde edilen parçalar yüksek yoğunlukludur. Bu nedenle parça eğer daha önce bu yöntemle

üretilmemişse onarılan bölgenin özellikleri çoğu zaman parçanın diğer bölgelerinden daha iyi olabilmektedir.



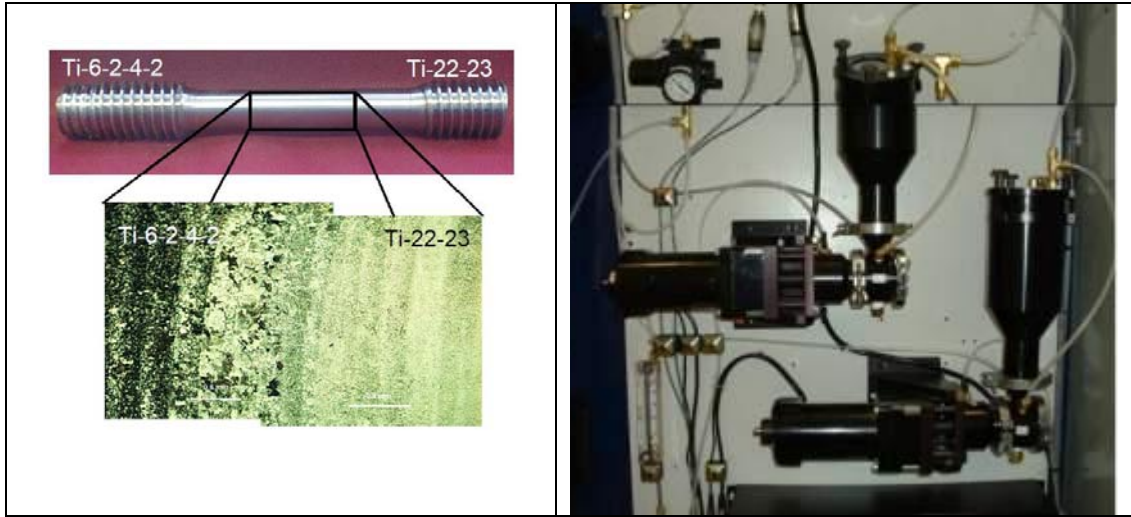
Şekil 3.2 LENS ile parça onarma [60].

Şekil 3.3'te 5 eksenli bir LENS makinesinin çalışması görülmektedir. Önce gövde oluşturulmuş, daha sonra nozulu taşıyan kafa 4. ve 5. eksenlerde hareket ettirilerek parça üretilmiştir.

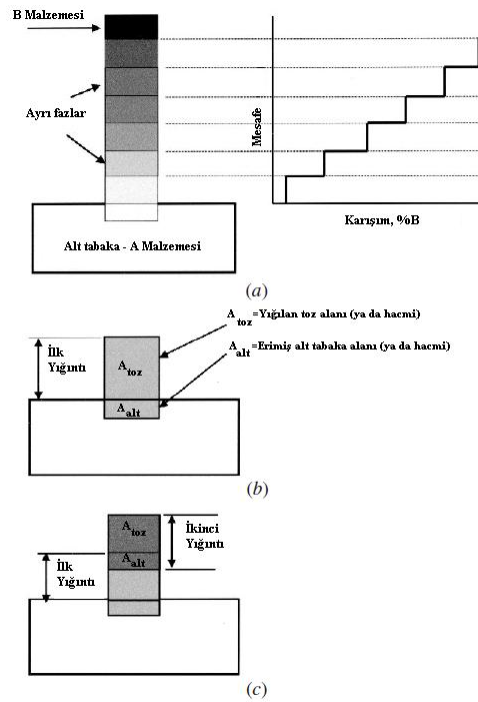


Şekil 3.3 LENS'te 5 eksenli düzenekle parça imalatı [60].

Alaşımsız, alaşımlı birçok malzeme ile çalışılabilmektedir. Kapalı devre denetim ile alaşımlandırma, imalat sırasında dahi gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.4, Şekil 3.5). Bu tür çalışmalarda aynı nozula farklı besleyicilerden gelen, farklı toz kanalları bağlanmakta ve servo motorlu toz besleyicinin hız ayarı ile taşıyıcı gazın basıncı değiştirilerek toz akma miktarları ayarlanmaktadır.

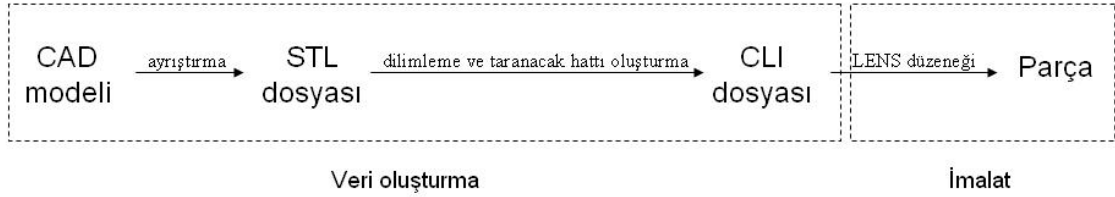


Şekil 3.4 LENS'te alaşımlandırılmış parça ve alaşımlandırma düzeneği [60].



Şekil 3.5 LENS'te A malzemesinin üstüne B malzemesini yığma [31].

LENS'te bir parçanın imal edilebilmesi için önce bir tasarım programı kullanılarak bilgisayar ortamında parça tasarımı gerçekleştirilir, oluşturulan model nokta bulutu haline dönüştürülür (STL dosyası) sonra çeşitli algoritmalarla katmanlandırılarak taranacak hat ve yol oluşturulur (CLI dosyası), oluşturulan hat izlenerek parça imal edilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 LENS ile hızlı prototipleme aşamaları [61].

İşlemde tozları birbirine bağlayan metalurjik bağlar, örme hat hat gerçekleştiği için güçlenir. Bu nedenle elde edilen parçalar yüksek yoğunluklu (Şekil 3.6) ve yüksek dayanımlıdır. Elde edilen parçanın özellikleri hız, toz kütle yığıma oranı gibi değişkenlerle oynanarak geliştirilebilmektedir.

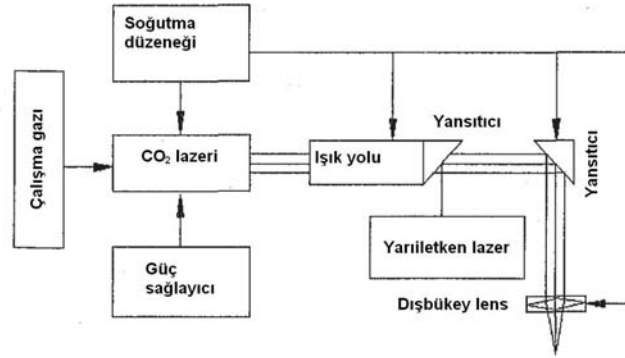
3.1 Temel İşlem Değişkenleri

Bir parçanın elde edilebilmesi, elde edilen parçanın istenen özelliklerde olabilmesi için LENS ile ilgili yapılacak herhangi bir çalışmada temel işlem değişkenlerinin ve bu işlem değişkenlerinin birbirleriyle ilişkilerinin [13] bilinmesi gerekir. Temel işlem değişkenleri lazer gücü, malzemenin spektral soğurması, lazerin nokta çapı gibi çalışma sırasında bilinen ya da denetlenebilen değişkenlerdir, elde edilen parçanın fiziksel özellikleri işlem değişkenleri ile doğrudan ilgilidir (Tablo 3.1).

3.1.1 Lazer gücü

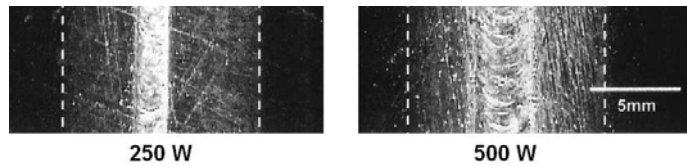
LENS'te lazer ışınlarını elde etmek üzere CO₂ ya da NdYAG lazerleri kullanılır. Malzemenin erime sıcaklığı civarında bir sıcaklık oluşturacak kadar ısı verecek bir lazer gücü gereklidir. Kullanılan lazer işlem sırasında uygun bir değere

ayarlanır. Lazerin gücü tozu eritecek ve yığacak kadar olmalıdır. Genellikle dalga boyu 10,2 mikron ve çıkış gücü 2 kW olan CO₂ lazeri kullanılır. Lazer enerjisini sağlayan düzeneğin temel bölümleri ışık yolu, lazer doğrultucu, yansıtıcı, dışbükey lens ve soğutma düzeneğidir (Şekil 3.7). Dalga boyu 1,02 mikron ve kırmızı renkli lazer, bir yarıiletken lazer yayıcı ile doğrultulur. Doğrultucu lazer ve CO₂ lazeri ortak merkezlidir.



Şekil 3.7 LENS'in lazer düzeneği [61].

Lazer enerjisinin hat kalınlığına etkisi vardır. Aynı miktardaki toz için kullanılan lazer enerjisi arttıkça hat kalınlığı büyür (3.8).

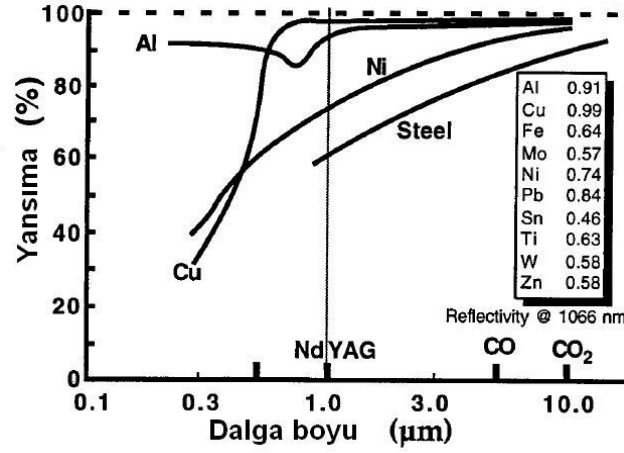


Şekil 3.8 Lazer enerjisinin değişiminin aynı miktardaki toza etkisi [29].

3.1.2 Malzemenin spektral soğurması

Herhangi bir malzemenin ışıqla ısınma hızı ışığı soğurma hızı ile doğru orantılıdır. Işığın soğurulması büyük oranda toza, tozun rengine ve şekline bağlıdır. Toz, tozun rengi, şekli hatta boyutu bilindiğinden malzemenin spektral soğurma hızı ve dolayısı ile erime hızı bilinir. Malzemenin ısınma ve soğuma hızı parça üzerinde gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu gerilmeler daha sonra parçanın hasar görmesine neden olabilir. Sağlıklı bir parça imal edebilmek için göz önünde

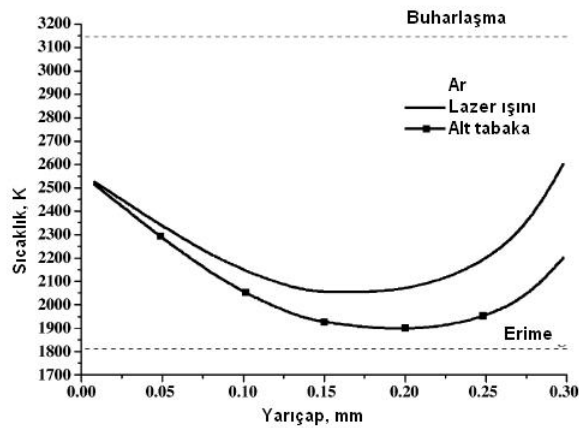
bulundurulması gereken bir etkidir. Şekil 3.9'da çelik, alüminyum, bakır ve nikel için çeşitli dalga boylarında lazer ışınlarının ne kadarını yansıtıp ne kadarını soğurduğu gösterilmiştir. Aynı dalga boyunda çelik daha çok ışın soğurur.



Şekil 3.9 Çeşitli malzemelerin farklı dalga boylarındaki lazeri yansıtması [48].

3.1.3 Lazerin nokta çapı

Lazer nokta çapı, ışın demetinin kesit alanının çapıdır. Lazer ışınlarını odaklamak için kullanılan lens ve lensin tüm özellikleri bilindiğinden lensten belirli uzaklıktaki ışın demetinin nokta çapı (kesit alanı çapı) bilinir. Noktanın çapı ne kadar küçükse enerji yoğunluğu aynı oranda büyüktür. Gücü belirleyici olmak kaydı ile hat kalınlığını, eriyen toz miktarını belirler (Şekil 3.9). Hat kalınlığı da büyük ölçüde üretilen parçanın yoğunluğunu ve yüzey pürüzlülüğünü belirler.



Şekil 3.10 Lazer ışın demeti çapının hat kalınlığına etkisi [39].

3.1.4 Lazerin nokta geçiş hızı

Lazerin yol alma hızıdır. Lazerin ışın demetinin kesit alanı çapını geçme hızı da denebilir. Enerjinin zamanla olan ilişkisi nedeni ile belirli bir noktadaki ısı birikimi o noktanın lazere maruz kalma süresine bağlıdır (formül 3.1).

$$\eta_a = \frac{E_{soğ}}{P_t} \quad (3.1)$$

η_a : Enerji transferi verimi,

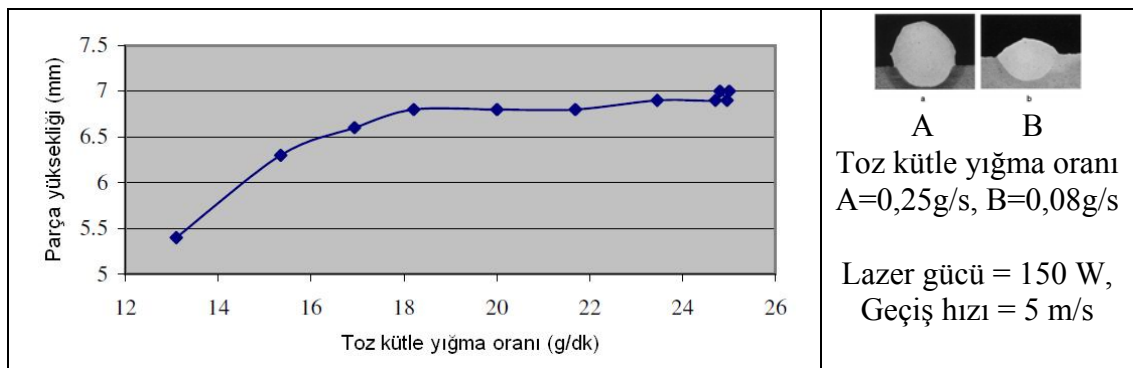
$E_{soğ}$: Tozların soğurduğu enerji (J),

P: Lazer gücü (J/s),

t: Süre (s).

3.1.5 Toz kütle yığma oranı

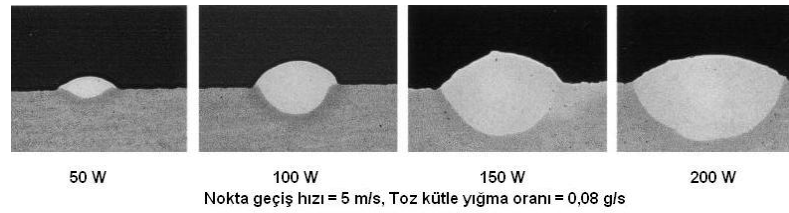
Isı birikimi kütle ile doğrudan ilişkilidir. Belirli bir zaman diliminde aynı malzemenin 1 birim kütlesi ile 2 birim kütlesi farklı zamanlarda aynı sıcaklığa gelirler. Bu durum işlem süresini ve süreye bağlı olarak elde edilen parçanın mekanik özelliklerini etkiler. Ayrıca toz kütle yığma oranının nozulun odak noktasındaki toz yığıntısının yüksekliği ve dağılma alanı ile de ilişkisi vardır (Şekil 3.11). Toz kütle yığma oranı hat kalınlığını da belirler, daha fazla toz daha geniş bir alana dağılır. Kullanılan lazer ışınının çapından daha geniş bir yüzeye yayılan tozlar erimeden kalabilirler. Toz kütlesini taşıyıcı gaz miktarı, tozun büyüklüğü, nozul çapı gibi parametreler belirler [52, 62, 63].



Şekil 3.11 Yığılan toz kütle miktarı ile parça yüksekliği arasındaki ilişki [31, 43].

3.1.6 Hat kalınlığı

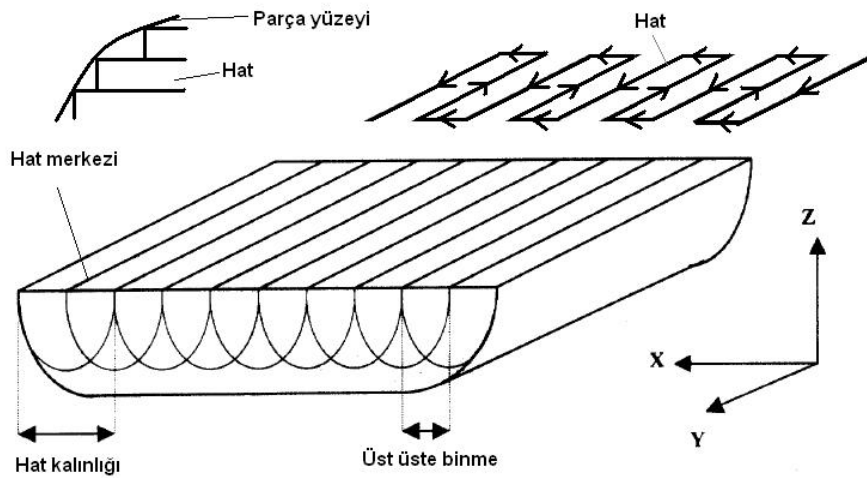
Yığmanın yapıldığı belirli bir doğrultuya hat denir (Şekil 3.13). Bu hat üzerinde yığılan toz kütlesinin miktarı, yayılma genişliği, yüksekliği, lazer enerjisi, lazerin nokta geçiş hızı ve lazer ışınının çapı bu hattın kalınlığını oluşturur. Şekil 3.10’da hat kalınlığının lazer gücü ile değişimi verilmiştir. Aynı işlem hızı ve toz miktarı için kullanılan enerji miktarı arttıkça hat kalınlaşır (Şekil 3.8, Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Lazer gücü ile hat kalınlığının değişimi [31].

3.1.7 Hat ardışıklığı (dizisi)

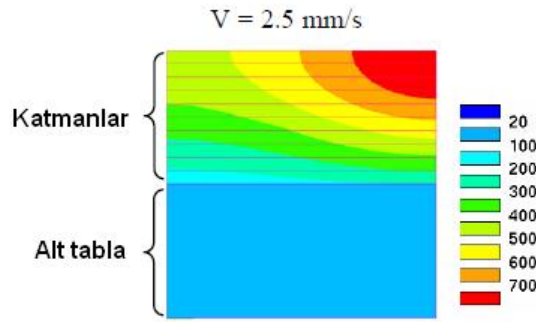
Paralel iki hat merkezinin birbirine uzaklığını ifade eder. Hatlar birbirine ne kadar yakınsa elde edilen parçanın boyutsal doğruluğu o kadar iyi olur (Şekil 3.13). Parçanın boyutsal doğruluğu önemli olmakla birlikte hatlar birbirine ne kadar yakınsa işlem hızına ve diğer parametrelere bağlı olarak soğuma hızı o kadar yavaştır (buna rağmen LENS’te soğuma hızı yüksektir).



Şekil 3.13 İzlenen hatlar ne kadar yakınsa parçanın doğruluğu o kadar yüksektir [3].

3.1.8 Alt katman sıcaklığı

Yığmanın üzerinde gerçekleştiği katmana alt katman denir. Makinenin alt tablası soğutulsa dahi katman sayısı arttıkça üstteki katmanın soğuması güçleşir ve sıcaklığı artma eğilimi gösterir (Şekil 3.14). Lazer gücü arttıkça ya da hat kalınlığı azaldıkça, hat ardışıklığı sıklaştıkça soğuma daha da güçleşir. İlerleme hızı düştükçe diğer işlem değişkenlerine bağlı olarak bir sonraki geçişe kadar aynı nokta daha kolay soğur.



Şekil 3.14 2,5 m/s ilerleme hızında parça üzerinde sıcaklık dağılımı [15].

3.1.9 Soğuma hızı

Çalışılan malzemenin soğuma hızını ifade eder. Soğuma hızı yüksekse daha rahat denetlenebilir bir çalışma ortamı sağlanmış olur. LENS'te soğuma hızı genelde yüksektir [19]. Kullanılan tozun malzemesine, hat ardışıklığına, lazer gücüne, ilerleme hızına bağlı olarak farklılaşır. Alt katman sıcaklığı soğuma hızına bağlıdır.

3.1.10 Toz boyutu dağılımı

Tüm tozların aynı boyutta olması istenir. Mikron boyutlardaki tozları teker teker ölçme olanağı olmadığından en azından birbirlerine yakın boyutlarda olmaları, boyutsal farklılıklarının az olması beklenir. Tahmin edilebilir bir yığma, denetlenebilir bir toz besleme sağlamak için toz boyutu dağılımının küçük bir aralıkta değişmesi istenir.

3.1.11 Taşıyıcı gaz hızı

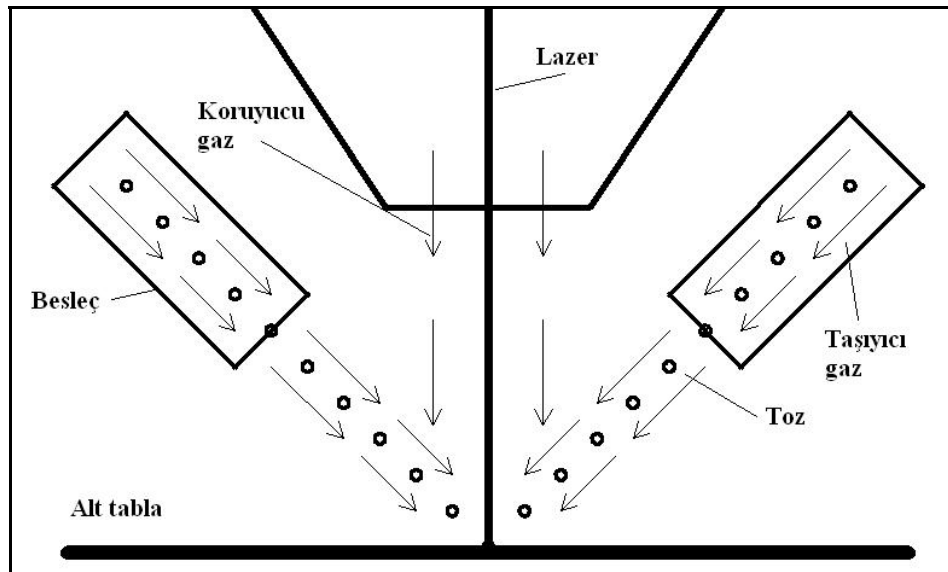
Tozu taşıyan, nozullardan akmaya zorlayan gazın hızı; basınca, nozul kesidine ve tozun çapına göre değişir. Yığılan toz miktarını etkiler, toz hızını belirler. Az da olsa parçanın soğumasını kolaylaştırır.

3.1.12 Koruyucu gaz hızı

Çalışma sıcaklıklarının yüksek olduğu uygulamalarda ışınları odaklayan lensi korumak için odak lensinin önüne basınçlı etkisiz (tepkimeye girmeyen, inert) gaz verilir [13]. Diğer işlem değişkenleri ile birlikte tozun belirli bir noktada odaklanmasını sağlayabilir.

3.2 Temel İşlem Değişkenlerinin Birbirileri ile İlişkileri

Temel işlem değişkenlerinin birbirleri ile ilişkilerini incelerken toz yığma işlemi (Şekil 3.15) sırasında makine tarafından denetlenebilen ve kullanıcı tarafından belirlenebilen değişkenler üzerinde durulur (Tablo 3.1).



Şekil 3.15 Toz yığma işlemi.

Tablo 3.1 LENS'in temel işlem değişkenleri ve etki ettikleri fiziksel özellikler

LENS'in temel işlem değişkenleri	Değişkenlerin etkidiği temel özellikler
1- Lazer gücü, 2- Malzemenin spektral soğurması, 3- Lazerin nokta çapı, 4- Lazer nokta geçiş hızı, 5- Toz kütle yığma oranı, 6- Hat kalınlığı, 7- Hat ardışıklığı (dizisi), 8- Alt tabaka sıcaklığı, 9- Soğuma hızı, 10- Toz boyutu dağılımı, 11- Taşıyıcı gaz hızı, 12- Koruyucu gaz hızı.	1- Sünme (bolverme) direnci (yield strength), 2- Gerilme dayanımı, 3- Kopma uzaması, 4- Yorulma dayanımı, 5- Sertlik, 6- Yüzey pürüzlülüğü, 7- Tane boyutu, 8- Malzeme gözenekliliği, 9- Boyutsal doğruluk.

3.2.1 Toz kütle yığma oranı – Taşıyıcı gaz hızı

Düzlem üzerinde toz birikebilmesi tozun kinetik enerjisi ile ilişkilidir. Tozun hızı yüksek olursa çarpmanın etkisi ile tozlar daha kolay dağılırlar. Tozun hızını taşıyıcı gaz hızı olarak adlandırılan [13] gaz debisini, tozun özgül ağırlığı, tozun boyutu ve nozulun eğimi belirler. Bu nedenle taşıyıcı gaz hızı yığılan toz kütlelerini doğrudan etkiler.

3.2.2 Toz kütle yığma oranı – Koruyucu gaz hızı

Lazerin odaklama lensini buharlaşma ya da eriyik sıçraması gibi etkilerden koruyan gaz, tozun yığıldığı noktaya doğru akar [13]. Koruyucu gazın hızının yüksek olması tozların yığılma noktasının uzağına düşmesine neden olabilir.

3.2.3 Toz kütle yığma oranı – Lazerin nokta geçiş hızı

Lazer nokta geçiş hızı makine tablasının yatay ekseninde, x-y koordinatlarında hareket hızıdır. Hem alt tablanın hem de tozun hareketli olması nozullardan akan tozların odak noktasından sapmasına, lazerin geçeceği yerde biriken toz miktarının düzensizleşmesine neden olabilir. Yığılan toz kütlelerinin yüksekliğinin (kesidinin)

işlem süresince sabit olması istenir (formül 3.2) [28]. Böylece parçanın yüksek yoğunluklu (fully dense) olması sağlanmış olur.

$$A_p = \frac{\eta_d \dot{V}_p}{S} \quad (3.2)$$

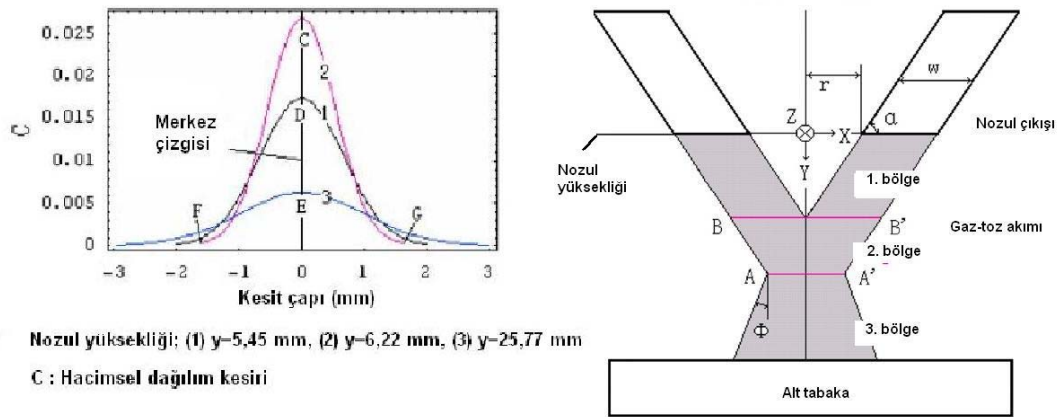
A_p : Yığılan tozun kesit alanı,

η_d : Yığılma verimi,

$\dot{V}_p$: Hacimsel besleme oranı,

S : Lazer nokta geçiş hızı (işlem hızı).

Hacimsel dağılım kesiri eşeksenli sürekli nozullarda, nozullardan akan tozların birleştiği noktadaki toz yoğunluğunu ifade eder (C ile gösterilmiştir) [38] (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Hacimsel dağılım kesiri.

Hacimsel dağılım kesiri nozulun yüksekliği ile değişir. Akım yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$, parçacık yoğunluğu 8.000 kg/m^3 , gaz viskozitesi $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$, çarpışma sonrası hız oranı 0,56, nozulun çapı 2 mm, parçacık çapı $75 \text{ } \mu\text{m}$ olmak koşulu ile hacimsel dağılım kesiri;

- Nozul yüksekliği 5,45 mm iken BB' ve AA' arasında grafikteki D noktası civarındadır,

- Nozulun yüksekliği 6,22 mm iken AA' bölgesinde grafikteki C noktası civarındadır,

- Nozulun yüksekliği 25,77 mm iken AA' ve alt tabaka arasında grafikteki E noktası civarındadır.

3.2.4 Toz kütle yığma oranı – Lazer gücü

Tozları eritmek için gereken ısı kütleye göre belirlenir. Bu durumda toz kütle yığma oranına göre lazer gücü ya da lazer gücüne göre toz kütle yığma oranı belirlenmelidir. Böylece ısıdan etkilenen bölge denetlenebilir olur ve sağlıklı bir prototipleme işlemi gerçekleştirilebilir (Şekil 3.12).

3.2.5 Lazerin nokta geçiş hızı – Lazer gücü

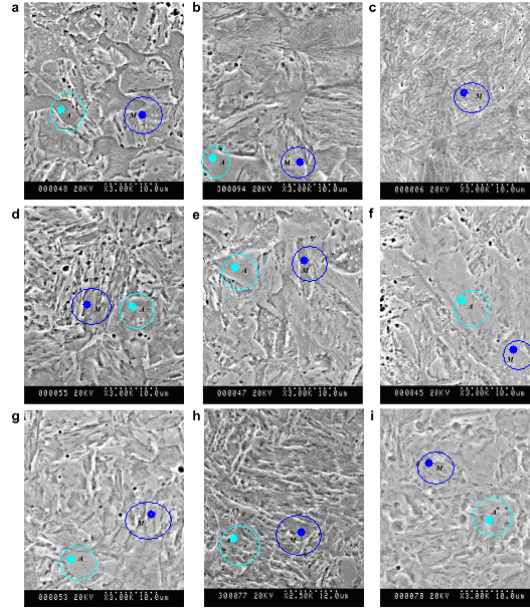
Lazerin nokta geçiş hızı, üzerinden geçtiği yerin lazere maruz kalma süresini belirler. Her malzemenin erime sıcaklığı bilindiğinden erime için gerekli ısı uygulanan lazer gücü ve uygulama süresi uygun değerlere ayarlanarak sağlanır.

3.3 Temel İşlem Değişkenlerinin Nihai Ürünün Fiziksel Özelliklerine Etkisi

LENS'in temel işlem değişkenleri elde edilen nihai ürünün; sünme (belverme) direnci (yield strength), gerilme dayanımı, kopma uzaması, yorulma dayanımı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, tane boyutu, malzeme gözenekliliği, boyutsal doğruluk gibi fiziksel özelliklerini etkiler [1]. Üretilecek parçanın kullanılma amacına uygun üretilmesi için işlem değişkenlerinin doğru ayarlanması yeterlidir. Örneğin; Şekil 3.17'de ilerleme hızının, nozul yüksekliğinin ve lazer gücünün değişmesinin AISI 410 paslanmaz çelikten elde edilen bir parçada östenit ve martenzit oluşumuna etkileri görülmektedir[17].

Bilindiği üzere martenzit, östenit halindeki çeliğin hızlı soğuması ile elde edilir. Yapıdaki östenit miktarına ve karbon (C) miktarına bağlı olarak, sıcaklık arttıkça elde edilen martenzit miktarı da artar [12]. Hızlı prototiplemede kullanılan güç yüksekse ilerleme hızına ve lazer odak noktasında yığılan toz miktarına bağlı

olarak sıcaklık ta yüksek olur. İlerleme hızı düşükse birim zamanda aynı noktaya daha fazla ısı etki eder. Yüksek sıcaklıklara daha çabuk çıkılabilir. Aynı nozul için yükseklik değıştikçe odak noktasında yığılan toz miktarı değışir. Daha az toz daha çabuk ısınır.



Şekil 3.17 A:östenit (açık mavi); M:martenzit (koyu mavi) [60].

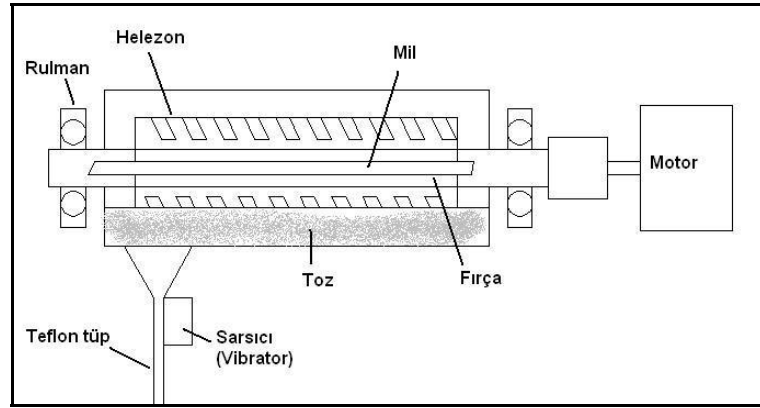
Hızlı prototiplemede genel bir ifade olarak soğuma hızının (örneğin 316 SS için 10^3 K/s [19]) yüksek olduğu da söylenebilir. Martenzitik ya da osatenitik bir yapı elde edilmek istendiğinde bu oldukça kolaydır. Bunun için işlem değışkenleri ile oynamak yeterlidir. Şekil 3.17’de a, b ve c resimlerindeki yapı elde edilirken ilerleme hızı 5 mm/s’de, nozul yüksekliği 9.525 mm’de sabit tutulurken, lazer gücü de sırası ile (a) 300 W, (b) 400 W, (c) 500 W olarak değıştirilmiştir. Yüksek lazer gücü ile yapının tamamı östenite dönüşmüş yüksek soğuma hızı neden ile de tüm östenit martenzite dönüşmüştür. d, e ve f resimlerindeki yapı elde edilirken lazer gücü 500 W’ta, nozul yüksekliği 6.667 mm’de sabit tutulurken, ilerleme hızı da sırası ile (d) 5 mm/s, (e) 10 mm/s, (f) 15 mm/s olarak değıştirilmiştir. nozullardan aynı miktarda toz akması halinde yüksek hız belirli bir noktada, birim zamanda daha az toz birikmesine neden olur. Aynı lazer gücü daha az tozu daha çok ısıtır. Yüksek sıcaklığa ulaşıldığından daha iri taneli bir yapı elde edilir. g, h ve i resimlerinde lazer gücü 400 W’ta, ilerleme hızı 5 mm/s’de sabit tutulurken nozul yüksekliği de sırası ile (g) 12.382 mm, (h) 9.525 mm ve (i) 6.667 mm olarak değıştirilmiştir. h’de %20’nin

altında, g'de %30 seviyelerinde, i'de %60 seviyelerinde östenit oluşmuştur. Her malzemenin yığılma miktarını dolayısı ile ısı birikimini etkilediği için özgül ağırlığına, yapı değişimini sağladığı için sıcaklığa ve soğuma hızına bağlı olarak farklı fiziksel özelliklere sahip bir yapıda parça elde edilebilir.

4. LENS'TE TOZ YIĞMA DÜZENEGİ

4.1 Toz Besleyici

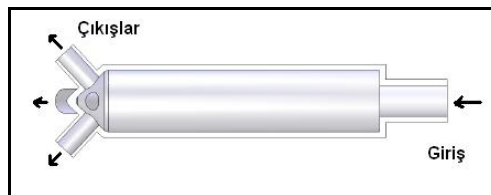
İşlemler sırasında kullanılacak toz bir hazne içindedir. Hazne içindeki toz servo motor tarafından tahrik edilen bir helezon yardımı ile haznenin çıkış ağzına doğru ötelenir ve bu çıkış ağzından bir gaz ile teflon tüp içinde taşınmaya başlar (Şekil 4.1). Tozun akmasını kolaylaştırmak için teflon tüp üzerine bir sarsıcı yerleştirilir.



Şekil 4.1 LENS'te toz besleme düzeneği [9].

4.2 Toz Dağıtıcı

Toz dağıtıcı (powder splitter) besleme düzeneğinden gelen tozu nozullara dağıtmak için kullanılır (Şekil 4.2). Toz ister sürekli (continious), ister süreksiz (discontious) eşeksenli püskürtülsün birden fazla nozul kullanılır. Her nozuldan aynı miktarda toz püskürtülmesi gerektiğinden bir dağıtıcıya ihtiyaç vardır. Eşeksenli püskürtmenin yapılmadığı ve toz dağıtıcının kullanılmadığı yöntemler de vardır.



Şekil 4.2 Toz dağıtıcı (splitter).

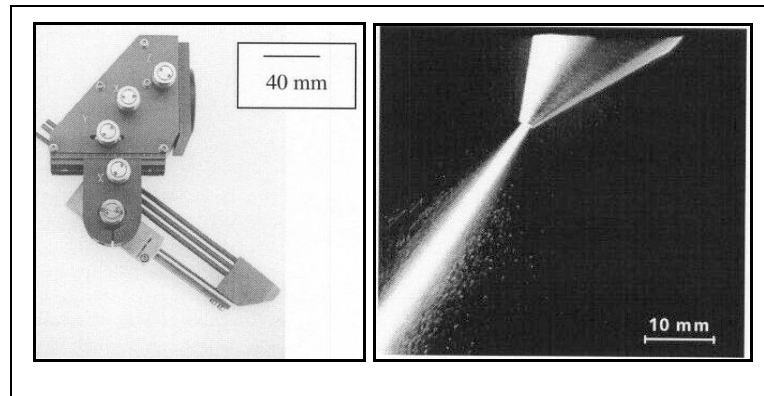
4.3 Nozul

Toz püskürtmek için 3 farklı yöntem ve her yöntem için farklı bir nozul kullanılır [38]:

1. Eksensiz (off-axis) nozul,
2. Eş eksenli sürekli (continuous coaxial) nozul,
3. Eş eksenli süreksiz (discontinuous coaxial) nozul.

4.3.1 Eksensiz (off-axis) nozul

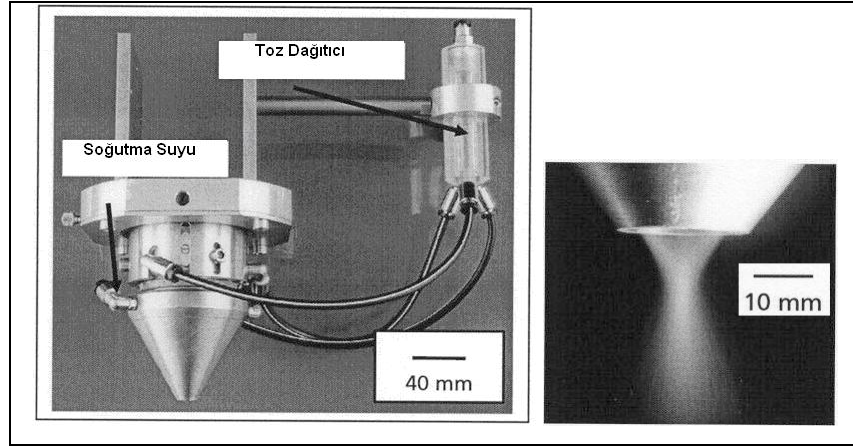
Eksensiz nozullarda bir tane toz akma kanalı ve açıklığı bulunur (Şekil 4.3). Bu nozulla yığma yapılan yöntemde nozul hareket doğrultusunda ya hareket yönünde ya da harekete ters yönde yerleştirilir. Hareket yönünde yerleştirildiğinde tozları lazer ışınlarının odak noktasında önden yığar. Harekete ters yönde yerleştirildiğinde tozları lazer ışınlarının odak noktasında arkadan yığar.



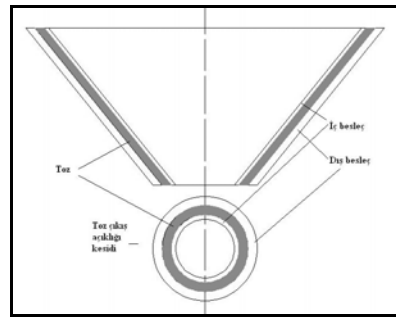
Şekil 4.3 Eksensiz (off-axis) toz püskürtme.

4.3.2 Eş eksenli sürekli (continuous coaxial) nozul

Bu nozullarda tek çıkış açıklığı bulunur. Lazer ışını eksen kabul edilirse, bu açıklığa eksen etrafında bulunan birden fazla kanaldan toz akar (Şekil 4.4). Tozlar iç ve dış nozul arasında eşit dağılarak çıkarlar (Şekil 4.5).



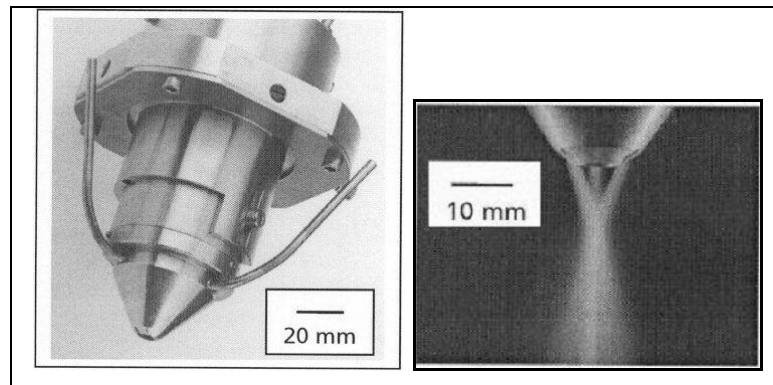
Şekil 4.4 Eşeksenli sürekli toz püskürtme.



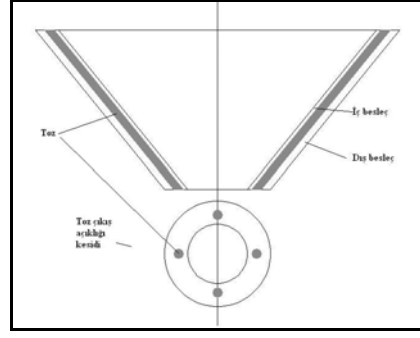
Şekil 4.5 Eşeksenli sürekli toz püskürtme kesidi.

4.3.3 Eş eksenli süreksiz (discontinuous coaxial) nozul

Eş eksenli süreksiz nozullarda birden fazla kanal ve toz çıkış açıklığı bulunur. Lazer ışını eksen kabul edilirse kanallar bu eksen etrafında eşit aralıklarla dağılmışlardır (Şekil 4.6) (Şekil 4.7). Tüm kanallar aynı noktaya odaklanmıştır.



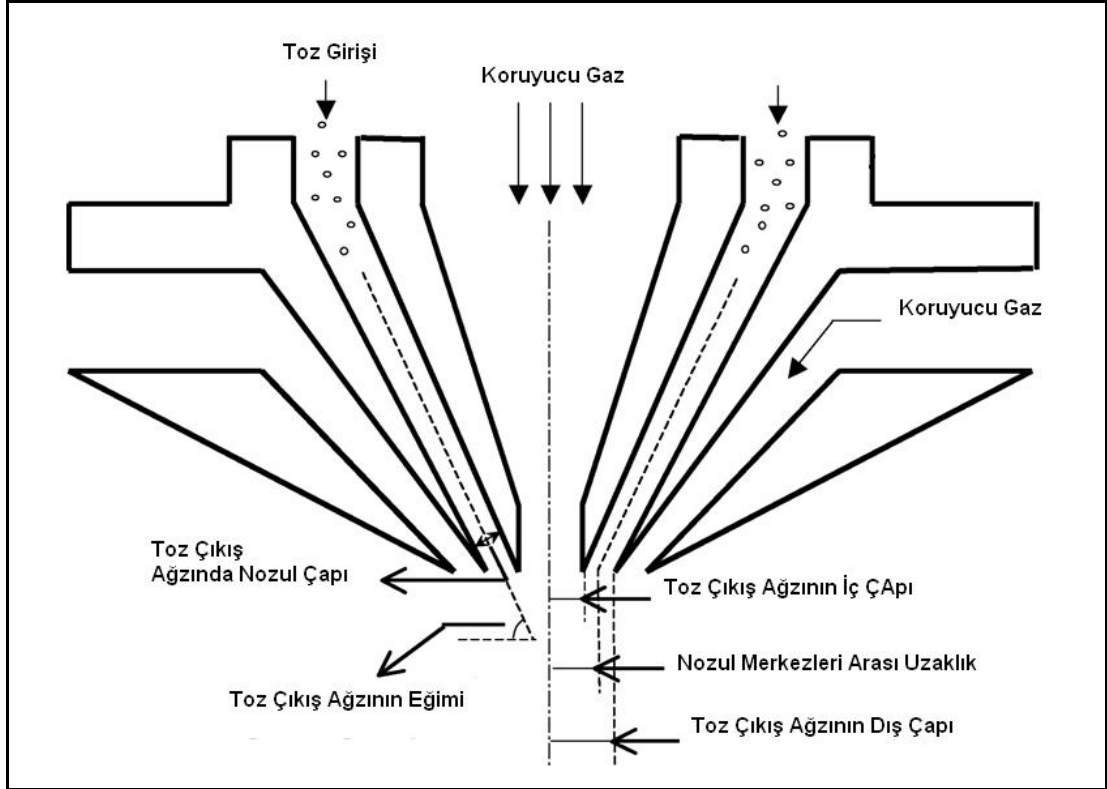
Şekil 4.6 Eş eksenli süreksiz toz püskürtme.



Şekil 4.7 Eş eksenli süreksiz toz püskürtme kesidi.

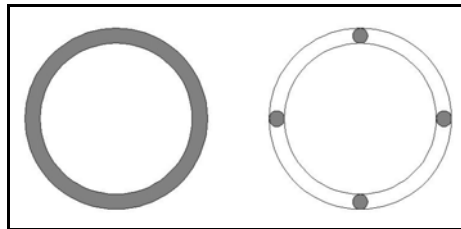
5. EŞ EKSENLİ NOZUL

5.1 Eş Eksenli Nozulun Yapısı



Şekil 5.1 Eş eksenli toz püskürtmede nozulun genel yapısı.

Eş eksenli Toz Püskürtme yöntemlerinde nozullar yığmanın gerçekleşeceği noktadan geçen bir eksen etrafında dağılmışlardır (Şekil 5.1). Sürekli ve süreksiz toz püskürten olmak üzere 2 eş eksenli nozul tipi vardır. Sürekli toz püskürten nozulda toz çıkış ağızları nozulun etrafında tam bir halka şeklinde iken süreksiz toz püskürten nozulda, nozulun etrafında genellikle 3 ya da 4 toz çıkış ağızı bulunur (Şekil 5.2).

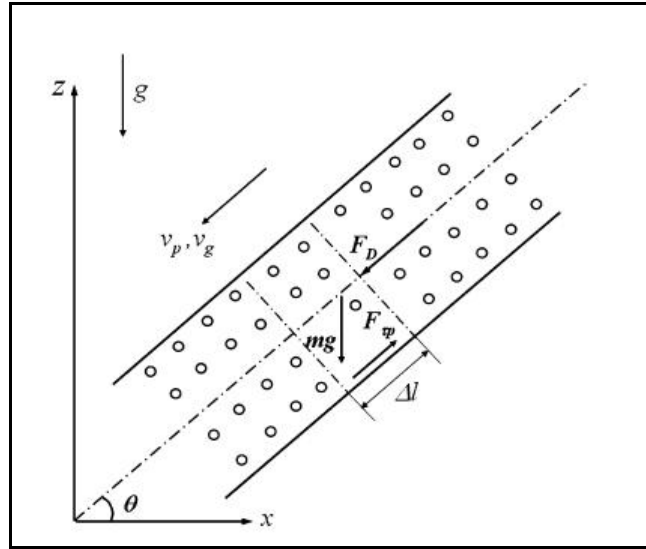


Şekil 5.2 Sürekli (solda) ve süreksiz (sağda) toz püskürtme nozulu kesitleri.

5.2 Eş Eksenli Nozulda Tozun Davranışı

Tozlar mikron ölçeklerde çok küçük tanecikler halinde, tozu akmaya zorlayan gaz ile birlikte aktıklarından tozun ağırlığından çok kütesinden söz edilebilir. Birim zamanda belirli bir odak noktasına yığılan toz miktarı, bu odak noktasına gönderilen lazer ışınlarının eritebileceği kadar olmalıdır. Daha az miktardaki toz istenmeyen sıcaklık artışlarına neden olabilir. Daha fazla toz erime işleminin sağlıksız ve eksik gerçekleşmesine sebep olabilir.

Tozu akmaya zorlayan taşıyıcı gazın basıncı nozul içinde gazın ve gazla birlikte taşınan tozun miktarını etkiler. Gaz basıncı, taşınan toz miktarından başka tablanın hızına bağlı olarak toz yığılma miktarını da etkiler. Gaz basıncı eğer yüksek ise odak noktasında yığılma gerçekleşmeyebilir, tozlar gazın etkisi ile savrulabilirler. Ancak nozuldaki tozun belirli bir noktaya yığılmasında, yığınının şeklinde büyük oranda nozul çıkış ağzı şeklinin, nozulun yüksekliğinin, nozul kesidinin genişliğinin, toz hızının ve gaz hızının etkisi vardır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Tozun akışına etkiyen kuvvetler [9].

Şekil 5.3'ten nozuliçindeki tozun hareketi için toplam enerji eşitliği kurulursa denklem (5.1) elde edilir;

$$F_D + mg \sin \theta - F_{\tau p} = m \frac{dv_p}{dt} \quad (5.1)$$

Eşitlik düzenlenirse denklem (5. 1), denklem (5.11) gibi olur;

$$F_D = Nf_D = m \cdot \frac{6}{\pi d_p^3 \rho_p} \cdot f_D \quad (5.2)$$

$$f_D = \frac{\rho_g C_D (v_g - v_p)^2}{2} \cdot \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (5.3)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (5.4)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_p |v_g - v_p|}{\mu_g} \quad (5.5)$$

$$v_g = \frac{Q_c}{\pi (d/2)^2} \quad (5.6)$$

$$F_{\tau p} = \frac{\lambda_p v_p^2 m}{2d} \quad (5.7)$$

$$\lambda_p = \frac{2,67(gd)^{5/6}}{v_p v_g^{2/3}} - \frac{2v_f gd}{v_p^2 v_g} \quad (5.8)$$

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p g}{6} = \frac{C_{Df} \rho_g (v_f)^2}{2} \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (5.9)$$

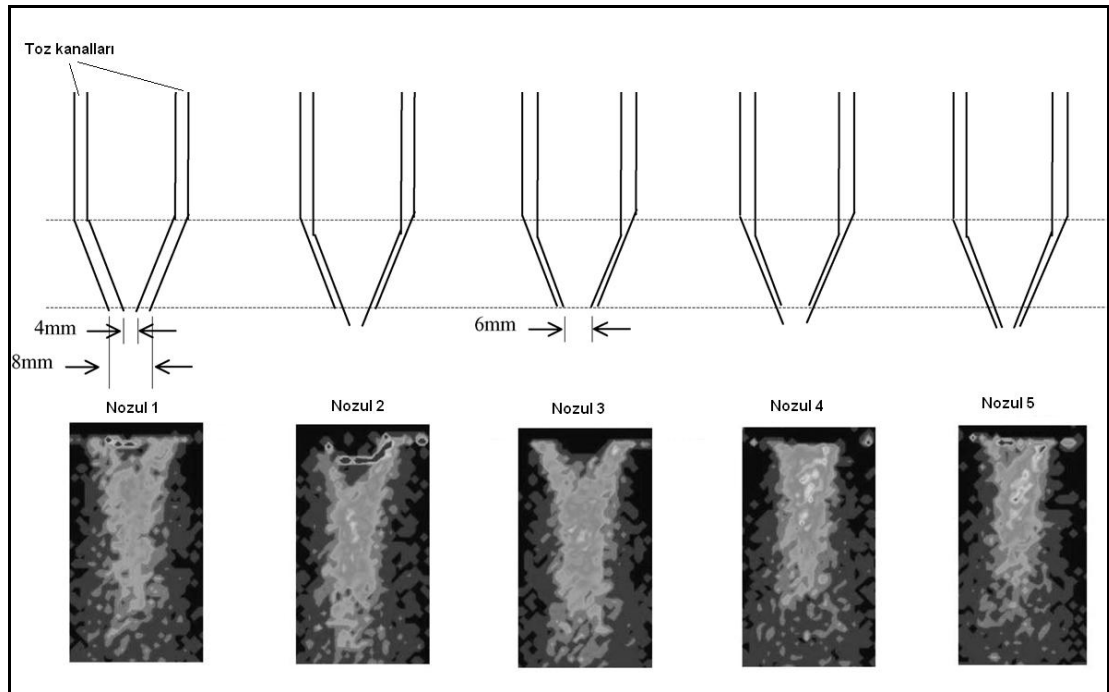
$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) = \frac{24\mu_g}{\rho_g d_p v_f} \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p v_f}{\mu_g} \right)^{0,687} \right] \quad (5.10)$$

$$\frac{3C_D \rho_g (v_g - v_p)^2}{4\rho_p d_p} + g \sin \theta - \frac{\lambda_p v_p^2}{2d} = \frac{dv_p}{dt} \quad (5.11)$$

F_D	; tozu hareket ettiren kuvvet (N)	Q_c	; gaz akış oranı ($m^3 s^{-1}$)
$F_{\tau p}$	; sürtünme kuvveti (N)	d	; nozul iç çapı (m)
v_p	; toz hızı (ms^{-1})	θ	; nozul eğimi ($^\circ$)
v_{pe}	; toz çıkış hızı (ms^{-1})	C_D	; sürüklenme katsayısı
d_p	; toz yarıçapı (m)	C_{Df}	; serbest düşüş sürüklenme katsayısı
ρ_p	; toz yoğunluğu (kgm^{-3})	Re	; Reynold sayısı
v_f	; serbest düşüş hızı (ms^{-1})	Ref	; serbest düşüş Reynold sayısı
v_g	; gaz hızı (ms^{-1})	λ_p	; parçacıkların yola bağlı enerji kaybı katsayısı
μ_g	; gaz vizkozitesi ($kgs^{-1}m^{-1}$)	G	; yerçekimi ivmesi (ms^{-2})
ρ_g	; gaz yoğunluğu (kgm^{-3})		

5.2.1 Nozul çıkış ağzının şeklinin toz yığılmasına etkisi

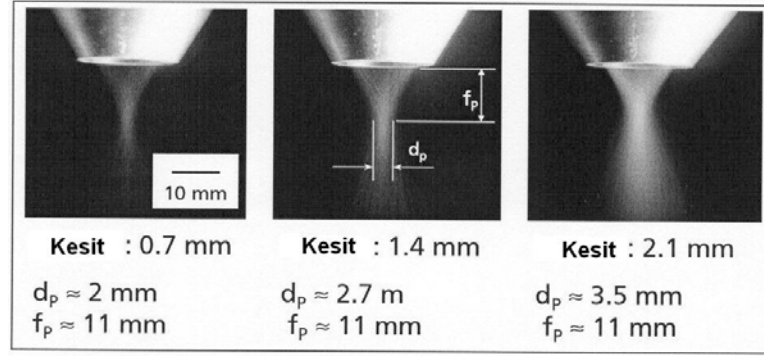
Nozulun kesidi ile birlikte nozul çıkış ağzının şeklinin belirli bir noktada istenen yoğunlukta toz yığılabilmek için önemi büyüktür. Şekil 5.4'te toz çıkış ağzının ve toz çıkış ağzında eşeksenli nozul çapının değişmesi sonucunda 0,068 g/s hızla akan toz yoğunluğunun değişimi verilmiştir [64]. Toz çıkış ağzı iç çapının büyütülmesi (Nozul 3) ya da dış çapının küçültülmesi (Nozul 5) toz davranışını daha kontrol edilebilir kılmış, dağılma çapını Nozul 1'e göre daraltmış ve nozulların odak noktasındaki toz yoğunluğunu arttırmıştır.



Şekil 5.4 Nozul çıkış ağzına göre toz yoğunluğunun değişimi.

5.2.2 Toz çıkış ağzında nozul çapının toz yığılmasına etkisi

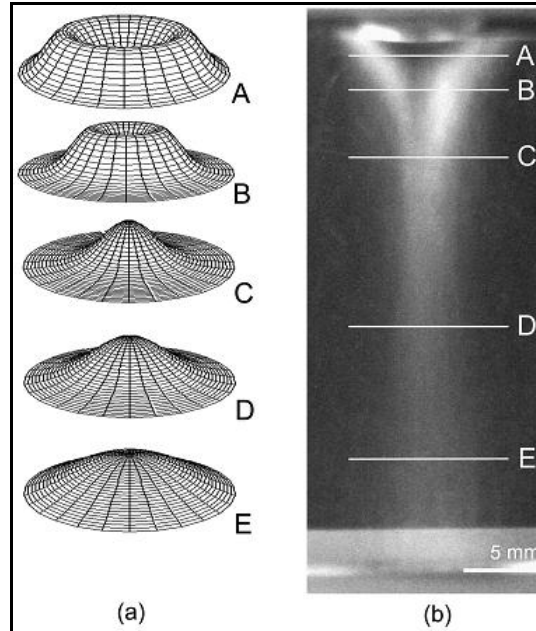
Toz çıkış ağzında nozul kesit çapı (tozun aktığı kanalın çapı) küçüldükçe tozun geçeceği kesit alan küçüleceğinden birim zamanda akan toz miktarı (g/s) azalır. Bununla birlikte Şekil 5.5'te görüldüğü üzere tozun yığılma noktasındaki yığılma genişliği de aynı oranda azalmaktadır. Nozul kesidini daraltmak yığılan toz miktarının denetlenmesini kolaylaştırdığı gibi, izlenen hat genişliğini de denetlenebilir hale getirir.



Şekil 5.5 Nozul kesit çapının toz yığılmasına etkisi.

5.2.3 Nozulun uzaklığının toz yığılmasına etkisi

Toz belirli bir yükseklikten dökülürken ilk temas ettikleri noktada ters koni şeklinde yığılır (Şekil 5.6) [63]. Yığının şekli tepe noktasına düşen toz sayısı belirler. Eğer tozların hacimsel dağılım kesiri büyükse tozlar zemine daha eşit dağılırlar ve tepe noktası alçak olur (Şekil 5.6 - E). Hacimsel dağılım kesiri küçük ise tepe noktası yüksek olur (Şekil 5.6 - C). Eğer nozul zemine çok yakın ise eşeksene dağılmış çıkış ağızlarından ayrılan her toz ilk temas ettikleri yerde kalma eğiliminde olacaklarından Şekil 5.6 –A’da olduğu gibi bir yığıntı oluşur.

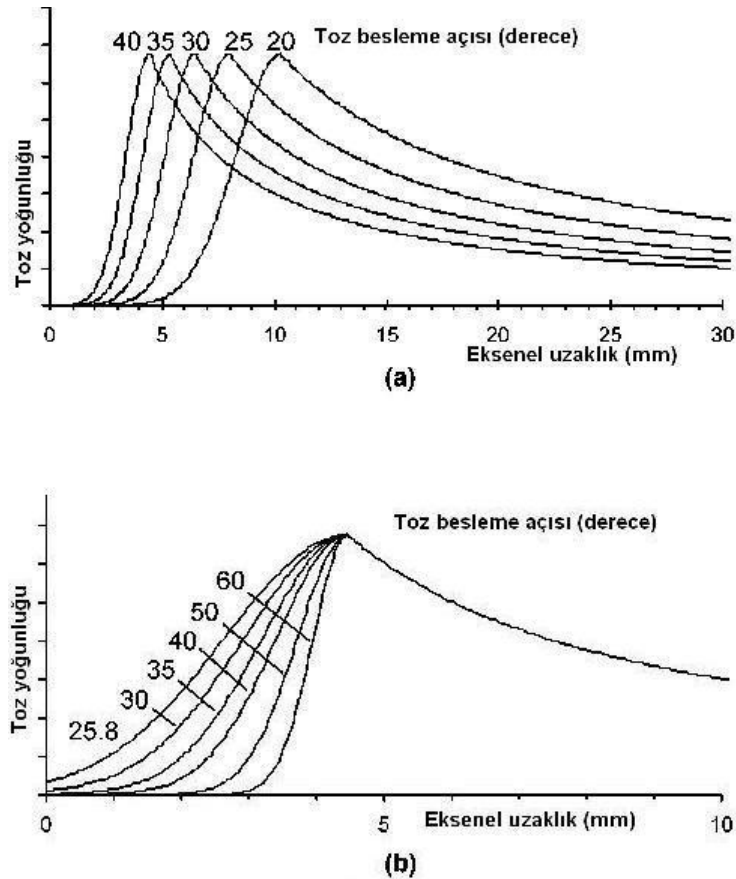


Şekil 5.6 Nozulun zeminden uzaklığının toz yığılmasına etkisi.

(Nozul çıkış ağzından uzaklıkları (mm): A=1.25, B=3.375, C=7.75, D=18.625, E=27.125)

5.2.4 Nozulun eğiminin toz yığılmasına etkisi

Nozulun zemine göre eğiminin de yığınının şekline etkisi vardır. Açı büyüdükçe (nozul dikleştikçe) Şekil 5.6 – C’dekine benzer bir yığıntı oluşur. Açı büyüdükçe yığınının tepe noktasının oluşma hızı artar, daha kısa sürede daha küçük bir yayılma (taban) yarıçapı (hat genişliği) ile daha yüksek bir yığıntı oluşur (Şekil 5.7). Küçük yayılma yarıçapının elde edilmesine küçük toz çıkış ağzı çapının da olumlu yönde etkisi vardır (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5). Şekil 5.7’de “a” grafiğinde toz çıkış ağzı çapı sabit tutulup nozulun yere göre eğimi değiştirilerek tepe noktasının oluşmasında eğimin etkisi incelenmiştir. “b” grafiğinde hem nozulun yere göre eğimi hem de toz çıkış ağzı çapı değiştirilerek oluşan yığıntılarının şekli incelenmiştir. Nozulun yere göre eğimi arttıkça ve toz çıkış ağzı çapı küçüldükçe tozun yayılma yarıçapı küçülmüş, tepe noktasının oluşma hızı artmıştır.

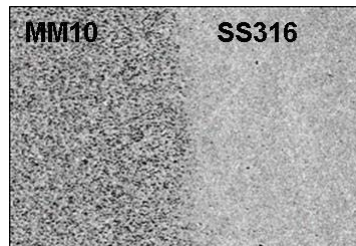


Şekil 5.7 Toz besleme açısının yığılmaya etkisi (toz çıkış ağzı çapı (a)’da sabit, (b)’de sabit değil).

6. ÇOK MALZEMELİ PROTOTİPLEME

Çok malzemeli prototipleme, çok malzemeli imalat ya da çok malzemeli tabakalandırılmış imalat (multi-material layered manufacturing (MMLM)) [55, 56] imalat teknolojilerinde belki de gelinebilecek son aşamayı ifade eder. Bir ürünün parçalarından daha ziyade kendisinin imal edilebilmesini sağlayan teknolojidir. Örneğin mekanik bir saatin farklı malzemelerden olan dişlilerinin, yaylarının, göstergelerinin, akrep ve yelkovanının, kordonunun bir prototipleme makinesinde, başka hiçbir talaşlı ya da talaşsız işlemeye gerek kalmadan, tek seferde imalatının gerçekleştirilebileceği bir teknolojidir. Mevcut şartlarda mekanik bir saatin tüm parçaları ayrı ayrı imal edilir, çeşitli talaşlı talaşsız imalat işlemlerinden geçirilir ve montajı gerçekleştirilir. Hem parçaların imalat yöntemlerinden kaynaklanan bir en küçük boyut sınırı vardır, hem de montaj edilebilirliklerini sağlamak için en küçük şekil ve boyut sınırları vardır. Bu nedenlerle saatin tasarımının da, nihai boyutunun da belirli sınırları vardır. Çok malzemeli prototipleme boyutsal olarak ta mevcut imalat yöntemlerinden çok üstündür. Çünkü parçalar cıvata, kaynak gibi bağlama yöntemlerine gerek kalmadan montaj edilebilmektedirler.

Çok malzemeli prototiplemede birbirinden farklı malzemelerle çalışılma zorunluluğu olduğundan henüz ileri prototipleme yöntemleriyle bu tür bir prototip üretimi gerçekleştirilememektedir. İleri prototipleme yöntemlerinden kasıt imal edilen prototiplerin, bilinen imalat yöntemleriyle üretilen parçalar gibi, doğrudan parçaya montaj edilerek kullanılabildiği LENS gibi prototip imalat yöntemleridir. LENS ile çeşitli prototip uygulamalarında prototipleme işlemi sürerken alaşım değişimi gerçekleştirilmiş, yan yana farklı malzemeler yığılmıştır [11, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 60] (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 LENS yöntemi ile yan yana yığılmış iki farklı malzeme [11].

6.1 Mevcut LENS Teknolojisinin Sınırları

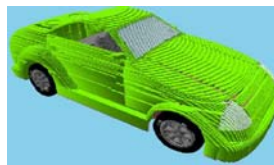
Hızlı prototipleme teknikleri tüm dünyada tasarım ve imalatın önemli bir unsuru haline gelmiştir. Bu tekniklerden özellikle LENS ile karmaşık şekilli, nihai ürün olarak kullanılabilecek parçalar üretilebilmektedir. LENS yöntemi ile hızlı prototiplemenin temel kısıtı prototipleme işlemi sırasında toz akışına nozulda müdahale edilememesidir. Malzeme yığılırken alaşımlandırma yapılabilen ya da belirli bir toz ile yığma gerçekleştirildikten sonra toz besleyicideki toz değiştirilerek nozuldan farklı bir tozun akması sağlanmaktadır. Alaşımlandırma için düzeneğe anlık müdahale edilebilmekte (Şekil 3.4), farklı bir toz yığabilmek içinse, akan ilk tozun nozuldan tamamen boşalması beklenmektedir.

İki farklı malzemenin yan yana yığılabilmesi için;

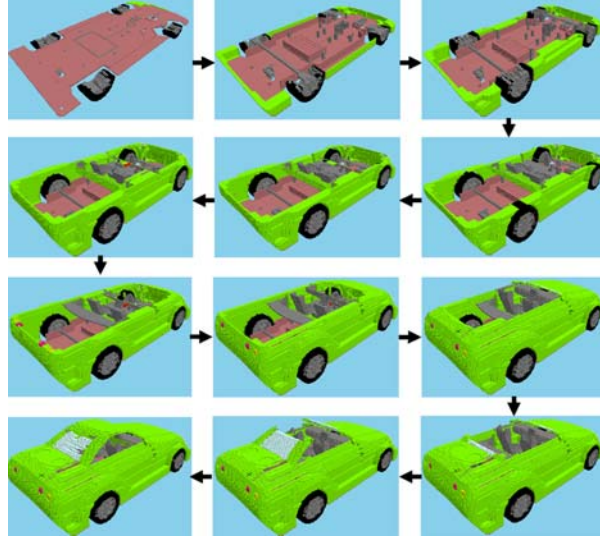
- 1 – Her malzeme için farklı hat oluşturmak gerekir.
- 2 – Enerjiyi anlık denetleyebilmek gerekir.
- 3 – Soğuma hızını anlık denetleyebilmek gerekir.
- 4 – Her malzeme tozunu ayrı ayrı denetleyebilmek gerekir.
- 5 – Tozun miktarını ve yoğunluğunu denetleyebilmek gerekir.
- 6 – Tozun akışını anlık denetleyebilmek gerekir.

6.1.1 Hat oluşturma

Bilgisayar ortamında tasarımı tamamlanan ürünün nokta bulutu oluşturulur (STL dosyası) (Şekil 6.2). Nokta bulutu ürünün kendisi ile aynı hacimdedir. Nokta sayısı ne kadar fazla, noktalar arası boşluk ne kadar küçük ise nokta bulutunun doğruluğu o kadar yüksektir. Nokta bulutu oluşturulduktan sonra çeşitli algoritmalarla katmanlandırılarak (Şekil 6.3), taranacak hat oluşturulur (Şekil 6.4) (CLI dosyası).

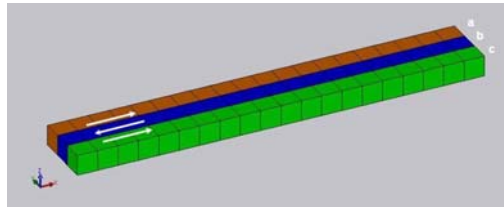


Şekil 6.2 Oyuncak bir otomobilin STL dosyası [55].



Şekil 6.3 Çok malzemeli bir oyuncak otomobilin katmanlandırılması [55].

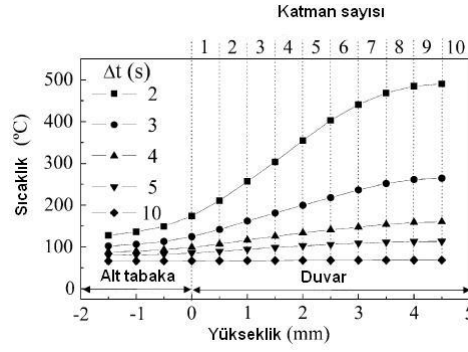
Her malzeme için hat ayrı ayrı oluşturulur. Hat oluşturulurken, oluşturulan hatların yığılma sırası belirlenir. Hatların yığılma sırası belirlenirken hat üzerine yığılacak tozun özellikle erime sıcaklığı dikkate alınır. İşlem sırasında tozun yığıldığı yerde ısıdan etkilenen bir bölge olduğundan (Şekil 6.5), önceden yığılmış tozun erime sıcaklığı yeni yığılan tozun erime sıcaklığından düşükse ilk yığılan hat bozulabilir. İlk yığılan tozun, erime sıcaklığı daha yüksek olan seçilmesi büyük oranda nihai ürünün güvenilirliğini belirler.



Şekil 6.4 Yan yana yığılmış 3 farklı toz için hat.

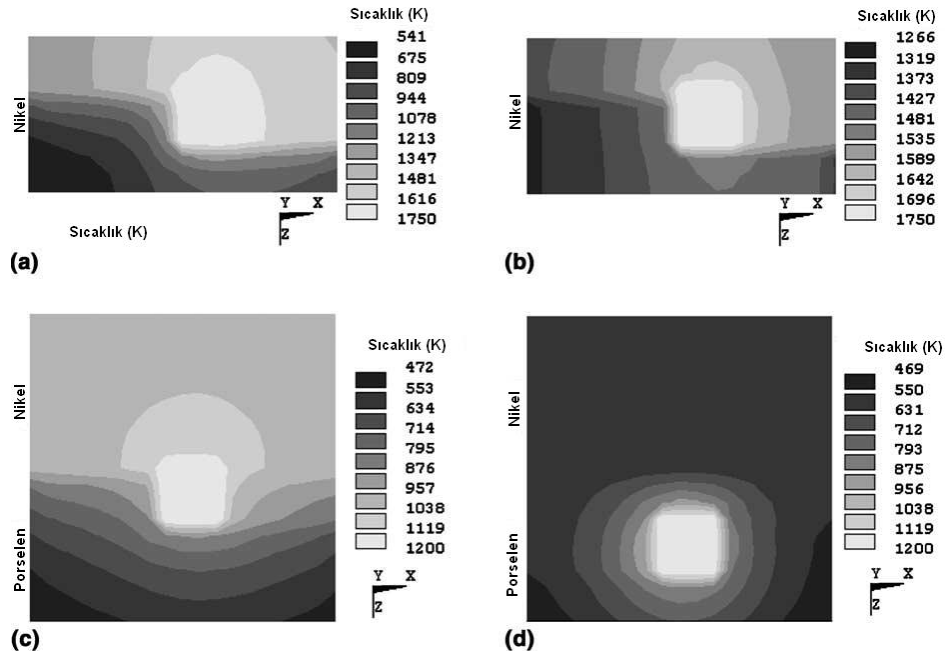
6.1.2 Soğuma Hızı

LENS yöntemi ile hızlı prototiplemede soğuma hızı yüksek olmasına rağmen işlem hızına, yığılan malzemenin erime sıcaklığına bağlı olarak işlem süresince parçanın sıcaklığı yüksektir (Şekil 6.5) [45]. İşlem hızı düşükse aynı bölgeye bir sonraki toz yığma anına kadar geçen süre uzar. Bu süre zarfında parçanın o bölgesi soğuma olanağı bulur.



Şekil 6.5 AISI 420 çelik için işlem hızına göre yığılan katmandaki ısı birikiminin sıcaklığa etkisi [45].

Şekil 6.6'da (a) ve (b) resimlerinde nikel yığılırken sırası ile 1. ve 2. hatlardaki sıcaklık dağılımı verilmiştir. 1. hat oluşturulurkenki en yüksek sıcaklık gradyanı (~ 629 K/mm) 2. hat oluşturulurkenki en yüksek sıcaklık gradyanından (~ 401 K/mm) büyüktür. Bunun nedeni; daha önce boş olan 1. hatta yığılan tozun ısı iletiminin düşük olmasıdır. 1. hat bittikten, hat üzerinde artık yoğun bir katı oluştuktan sonra, katının toza göre yüksek ısı iletimi nedeni ile 2. hatta sıcaklık gradyanı düşmektedir. Prototip oluşturulurken, yığma sırasında bu durum dikkate alınarak, sıcaklığın sabit tutulabilmesi için lazerin gücü düşürülmelidir.



Şekil 6.6 Nikel ve porselen tozlarının yan yana yığılması sırasında sıcaklığın dağılımı [65].

6.1.3 Toz akışının denetlenmesi

Farklı malzemeleri yığarken toz akışının anlık olarak denetlenmesi gerekir. Her toz için ayrı bir besleyici, dağıtıcı ve nozul kullanılır. Nozulun çapı, tozun çıktığı ağzın yapısı, nozul açıklığının büyüklüğü toz akışına etki eder (5. bölüm). Tez çalışmasının amacı; toz akışına nozulun çıkış ucunda müdahale edilebilmesine olanak sağlayan bir yöntem geliştirmektir.

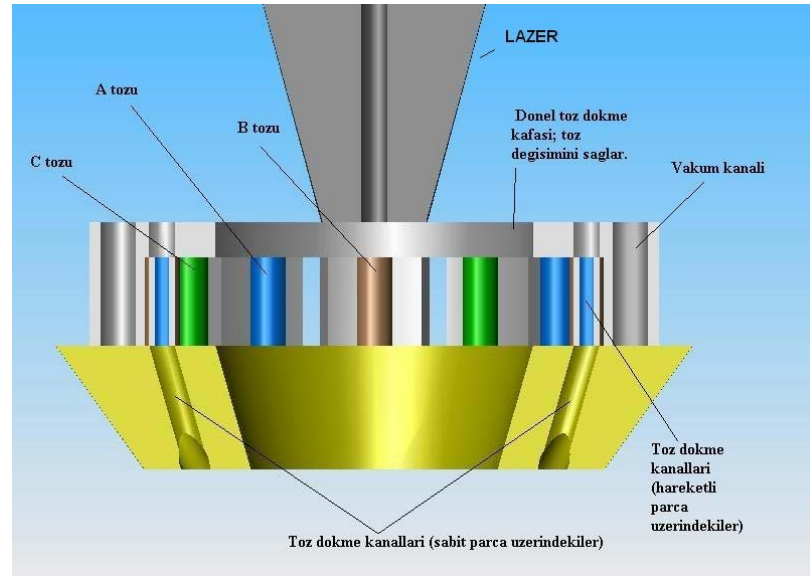
6.2 Çok Malzeme Yığabilecek Nozul Tasarımı

Mevcut nozul sistemlerinde tozun akması toz besleyiciden mekanik olarak tozun borulara iletilmesi, borulardan basınçlı gaz yardımı ile nozula ve nozuldan da yığma düzlemine taşınması şeklinde gerçekleşir. Bu yöntemde toz akımının durdurulması tozu besleyiciden borulara ileten mekanik sistemin durdurulması ve borulardan nozula, nozuldan yığma düzlemine taşıyan gazın kesilmesi ile sağlanır. Denetleme noktalarının tozun nozuldan çıkış noktasından çok uzakta olması, toz akımı başlatıldıktan ya da durdurulduktan çok sonra nozulun çıkış ucunda etkisini göstermektedir. Örneğin denetleme noktası ile nozulun çıkış ucu arasında doğrusal olarak 200,00 mm'lik bir mesafe bulunabilir. Tozun akması durdurulduğu zaman 200,00 mm'lik bir mesafede denetlenemeyen bir toz kütlesi bulunur. Bu toz kütlesinin bir kısmı nozuldan akıp çıkarken, geriye kalan kısmı denetleme noktası ile nozul çıkış ucu arasında bir yerlerde, dağınık halde kalmaktadır. Tozun akmasına izin verildiği zaman da tozun 200,00 mm'lik bir mesafeyi kat etmesi için bir süre beklenir. Sonuçta tam denetlenebilir bir açma – kapama işlemi gerçekleştirilemez, toz akışı doğrudan denetlenemez. Tozun denetlenememesi düzensiz bir yığmaya neden olur. Tozun akmasının ya da akmamasının diğer denetleme noktaları ile eşzamanlı olarak nozulun çıkış ucunda sağlanması durumunda düzenli bir toz akışı ve yığma işlemi temin edilmiş olur.

Başlangıçta toz akımını anlık olarak denetleyebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler yeterli bulunmayarak “gaz perdeli nozul” geliştirilmiştir.

6.2.1 Tasarım 1

Mekanik bir düzendir. Üst üste yerleştirilmiş 2 parçadan oluşmaktadır (Şekil 6.7). Üstteki parçada dörderli gruplar halinde 3 toz kanalı ve 4 vakum kanalı bulunmaktadır. Alttaki parça nozuldur, üzerinde 4 toz kanalı, 8 vakum kanalı bulunmaktadır. Üstteki parça döndürülerek akması istenen tozun kanalının, nozuldaki toz kanalının üzerine gelmesi sağlanır. İki toz kanalı üst üste gelince toz akmaya başlar. Vakum kanallarının görevi toz değişimi sırasında nozuldaki kanal içinde kalan fazla tozları geri toplamaktır. Nozulun kendisi, üzerindeki parça, parçayı hareket ettiren düzendir, toz ve vakum boruları ile birlikte oldukça büyük bir hacim kaplayacağı düşünülerek tasarım geliştirilmemiştir. Toz değişimi sırasında üstteki parçanın birkaç tam dönme yapması durumunda tüm boruların ve kabloların birbirine dolanma olasılığı da yöntemin zaaflarındandır.

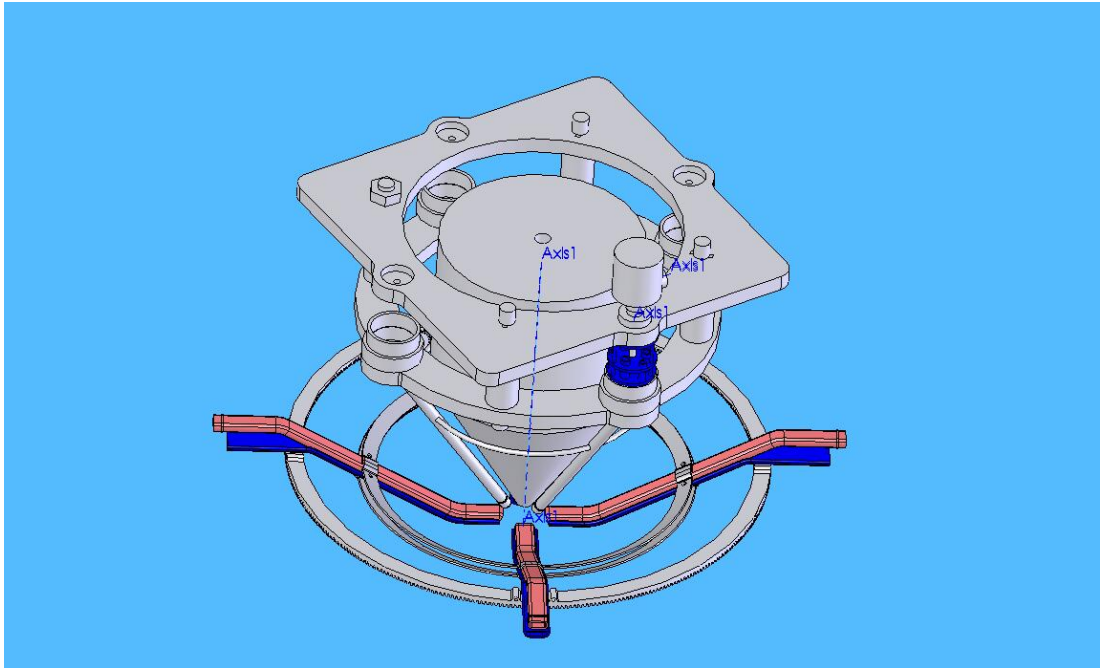


Şekil 6.7 İlk tasarlanan nozul (Tasarım 1).

6.2.2 Tasarım 2

Tozun yığma noktasına beslendiği nozul, fazla tozları toplayan vakum kanalları, soğutucu sıvı kanalları, diğer mekanik parçaları ile birlikte oldukça büyük bir hacim kaplar (Şekil 6.8). Üzerinde 4 toz kanalı ve 4 vakum kanalı bulunmaktadır. Toz değişimi döner kafalar ile sağlanmaktadır. Bu döner kafa nozulun çıkış ucundan

yaklaşık 100 mm yukarıdadır. Her toz kanalı için bir döner kafa kullanılmaktadır. Döner kafalara 3 farklı tozun besleyicisinden gelen kanallar bağlanmıştır. Döner kafa üzerinde bir kanal bulunmaktadır. Bu bir kanal akmasına izin verilen tozun kanalının önüne getirilerek tozun akması sağlanır. Döner kafa ile nozulun çıkış ucu arasında kalan önceki tozlar akmaya devam ederler. Bu tozlar yığma düzlemine düşmeden vakum kanalları ile ortamdan uzaklaştırılırlar. Vakum kanalları 2 parçadırlar. 1 parçadan soğuk sıvı akmaktadır. 2. parça toz ile birlikte bu sıvıyı da vakumlamaktadır. Vakumlanan tozun sıvı ile daha kolay uzaklaştırılabileceği düşünülmüştür. Sıvının aynı zamanda yığma bölgesindeki ısıyı düşürebileceği de varsayılmıştır. Toz değişim yerinin yığma noktasından uzakta kalması, tüm düzeneğin büyük bir hacim kaplaması, vakumlama işleminin denetlenmesinin zor olması nedenleri ile üzerinde çalışılmamıştır.

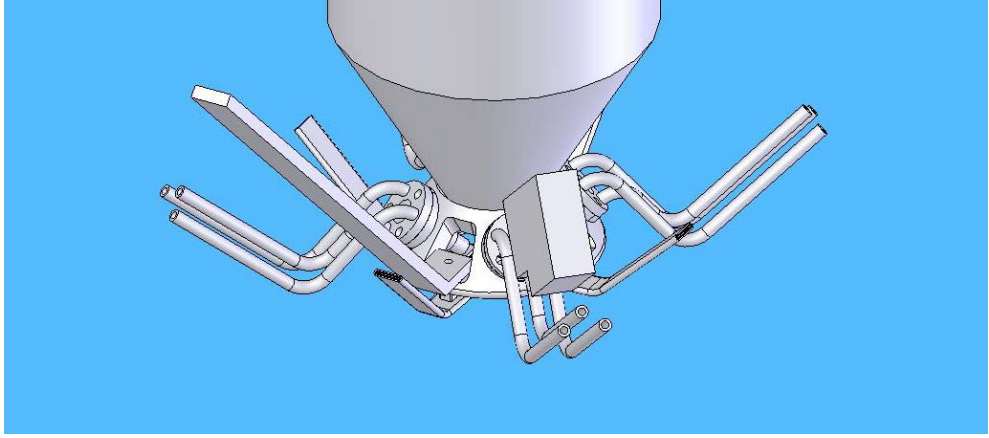


Şekil 6.8 Tasarlanan ikinci nozul (Tasarım 2).

6.2.3 Tasarım 3

Düzenekte 4 toz çıkış kanalı bulunmaktadır (Şekil 6.9). Her toz kanalı servo motorla denetlenen bir düzeneğin parçasıdır. Düzeneğe gelen üç toz kanalının çıkışı tek bir kanala bağlanmıştır. Bu kanal içinde tek girişi, tek çıkışı bulunan ikinci bir kanal daha vardır. Bu kanal döndürülmek koşulu ile akması istenen tozun kanalının

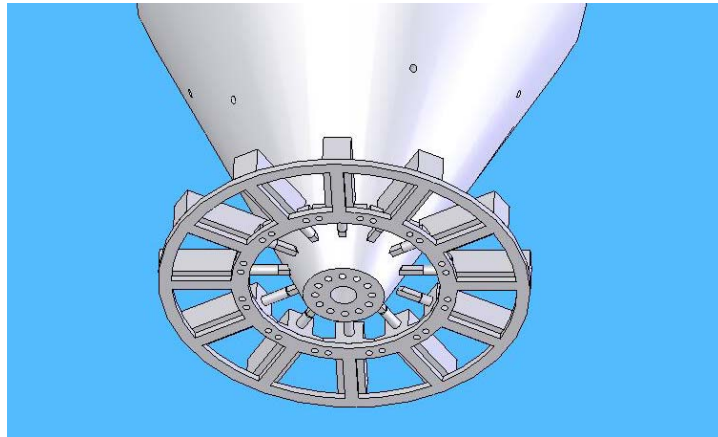
ucuna getirilerek o tozun akması sağlanır. Boyutlarının büyüklüğü, ağırlığı ve toz denetiminin güçlüğü nedeni ile üzerinde çalışılmamıştır.



Şekil 6.9 Tasarlanan üçüncü nozul (Tasarım 3).

6.2.4 Tasarım 4

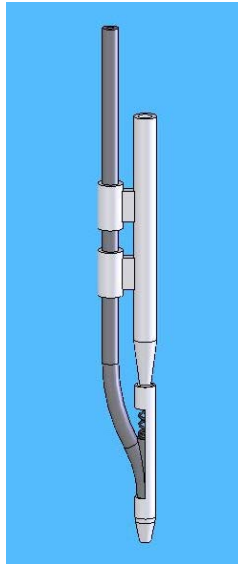
Düzenek 12 kanaldan ve her kanalı açıp kapayan bir aktuatordan oluşmaktadır (Şekil 6.10). Aktuatorlerin her birinin ucunda kapak görevi gören bir parça bulunmaktadır. Aktuatorun bu kapağı ileri geri hareket ettirmesi ile nozulun açılıp kapanması sağlanmak istenmiştir. Açma – kapama bölgesinde sızdırmazlık sağlamanın güçlüğü, toz denetiminin tam sağlanamaması, yüksek ısının Aktuatorlerin çalışmasını olumsuz etkileme olasılığı ve düzeneğin boyutlarının büyük olması nedenleri ile üzerinde çalışılmamıştır.



Şekil 6.10 Tasarlanan dördüncü nozul (Tasarım 4).

6.2.5 Tasarım 5

Hava basıncı ile çalışan yaylı bir düzeneştir (Şekil 6.11). Toz kanalının çıkış ucuna yerleştirilen yaylı bir parça, arkasındaki ikinci parçanın üflediği basınçlı gaz ile tozu açar kapar. Yaylı parçanın açıp - kapama ucunun tasarımı ve imalatı oldukça zordur. Açıp – kapama ucu küresel olarak tasarlanmıştır. Böylece nozulun çıkış ucu tam olarak kapatılabilecektir. Ayrıca açma- kapama bölgesi kapatılarak tozun hareketinin çıkışa kadar kararlı hale gelmesi hedeflenmiştir. Nozulun eksensiz nozul olarak ta kullanılabilmesi üstünlüğüdür. Önceki tasarımlardan daha küçük hacimlidir. Ancak yay kullanma zorunluluğu titreşim sorunu çıkarmaktadır. Titreşim kanal içindeki tozun akmasına katkıda bulursa da kanal çıkışında tozun hareketini kararsızlaştırmaktadır, odak noktasının sapmasına neden olmaktadır.

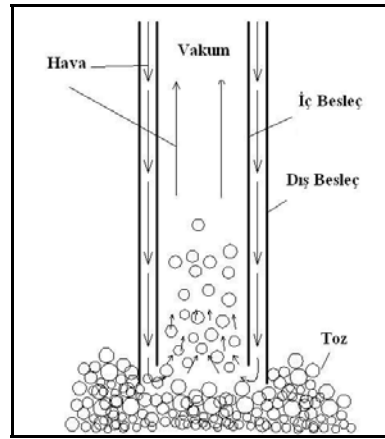


Şekil 6.11 Tasarlanan beşinci nozul (Tasarım 5).

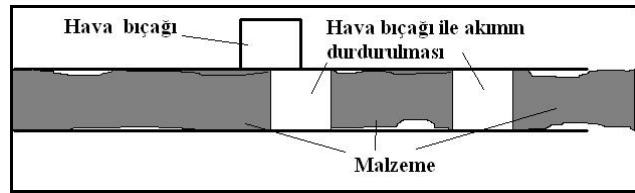
6.2.6 Tasarım 6

Yöntem, nozul çıkışında toz akımının önünde hava perdesi oluşturarak toz akımını durdurma esasına göre çalışır. Hava perdesi, hali hazırda şartlandırılan (iklimlendirilen) belirli bir ortamın korunması için kullanılmaktadır. Genellikle alışveriş merkezlerinde kullanılan bir uygulamadır. Giriş ve çıkışlarda kapıların hemen üzerine yerleştirilen bir klima tarafından kapının önüne sürekli bir hava akımı

verilmektedir. Bu hava akımı bir tür perde görevi görmekte ve büyük oranda içerideki şartlandırılmış havanın dışarıya kaçmasını önlemektedir. Nozuldan toz akımının da benzer bir yöntemle durdurulabileceği öngörülmektedir. Ancak tozun aktığı bir nozulda gaz perdesi oluşturmak güçtür. Nozulun şekli nedeni ile vakum etkisi (vakum pompaları) oluşabilir ve bu vakum daha fazla tozun akmasına neden olabilir (Şekil 6.12). Uygun tasarım, gaz basıncı gibi etkenlerle toz akmasının durabileceği ise hava bıçağı (air knife) uygulamalarından anlaşılmaktadır. Örneğin dolum yapılan bir tesiste boru içindeki akış belirli aralıklarla durdurularak darbeli, denetlenebilir bir akış sağlanmaktadır (Şekil 6.13). Yöntem ve tasarım 7. bölümde açıklanmıştır.



Şekil 6.12 Vakum pompası [66].

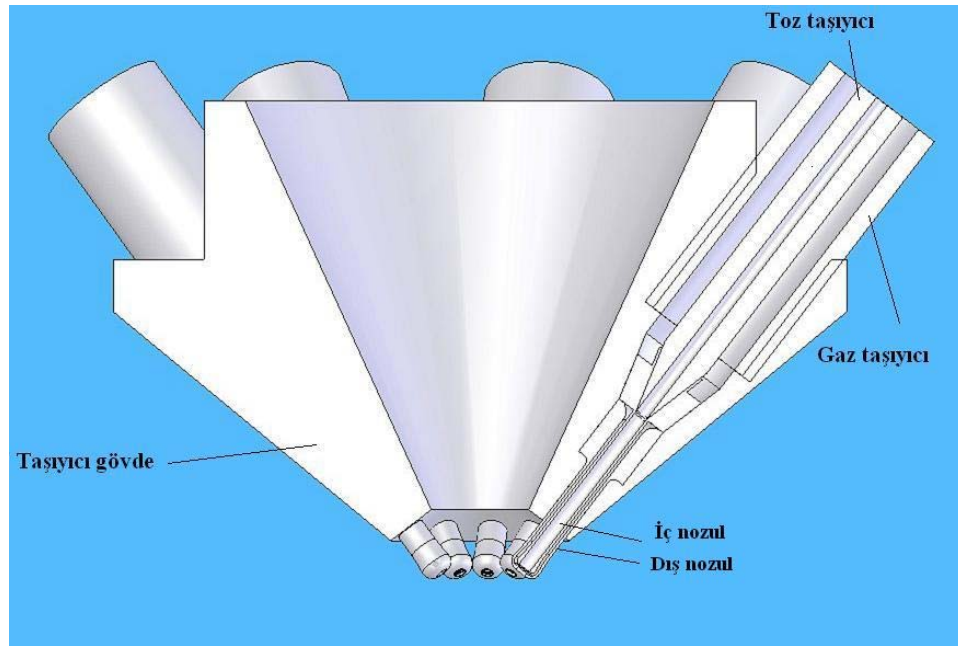


Şekil 6.13 Hava bıçağı [66].

7. GAZ PERDELİ NOZUL

Gaz perdesi günümüz mühendislik uygulamalarında alışveriş merkezleri gibi şartlandırılmış bir ortamdaki kayıpları azaltmak için kullanılır. Odanın giriş ve çıkışlarında kapının hemen üzerine yerleştirilen klimalar ile oluşturulan gaz perdesi yaz aylarında içerdeki soğuk havanın dışarıya kaçmasını dışarıdaki sıcak havanın da içeriye girmesini önler.

Mevcut nozullar içinde tozlar bir gaz yardımı ile akarlar. Gaz perdeli nozul bu toz-gaz akımının önünde bir hava akımı oluşturarak toz akışının durdurulabileceği öngörülmektedir. Nozul iç içe 2 parçadan oluşur (Şekil 7.1). Dış nozuldan sadece perdeyi oluşturacak gaz akmaktadır. İç nozuldan ise toz kendisini akmaya zorlayan gaz ile birlikte akmaktadır (Teknik resimler ekte verilmiştir).



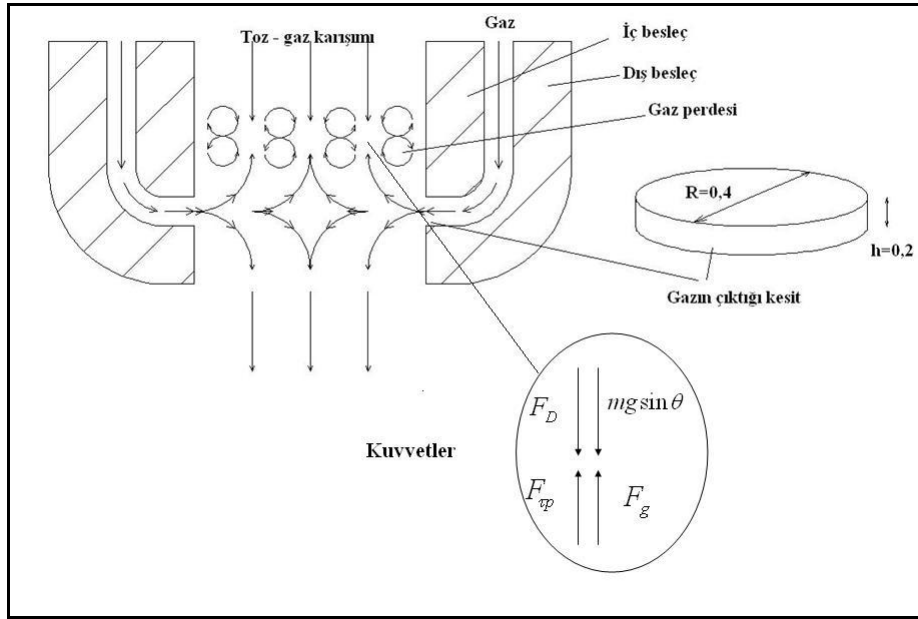
Şekil 7.1 Gaz Perdeli Nozul'un yapısı.

7.1 Gaz Perdesinin Oluşumu

Dış nozuldan akan gaz, toz akımını engelleyici gaz perdesini oluşturmak için kullanılır. Toz akımını engelleyici gaz dış nozul içi ile iç nozulun dışı arasından akar. Dış nozulun ucu içe doğru büküktür. Dış nozulun çıkış ucunda gaz nozul dışına

doğru ve iç nozulun içine doğru olmak üzere 2 farklı yöne doğru akar (Şekil 7.2). Bu iç nozuldan akan tozu, dış nozuldan akan gazın belirli bir kısmının karşıladığı anlamına gelir. Bir noktada hareketin olmaması için o noktaya etkiyen kuvvetlerin yaptıkları işler toplamının sıfır olması gerekir (denklem (5.1)). Denklem (5.1)'i Şekil 7.2 dikkate alınarak tekrar düzenlenirse denklem (7.1) elde edilir. Bu denklemden, dış nozuldan yeterli miktarda gaz akması durumunda tozun akışının durabileceği görülmektedir (bu çalışmada nozul eğim açısı “ θ ” ve tozların iç nozula sürtünme kuvveti $F_{\tau p}$ ihmal edilmiştir).

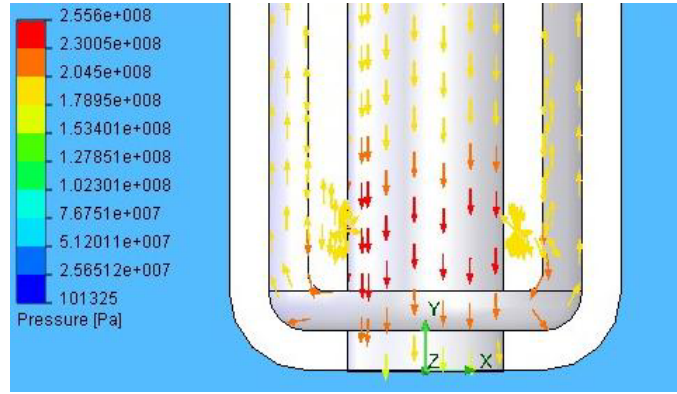
$$F_D + mg \sin \theta - F_{\tau p} - F_g = m \frac{dv_p}{dt} = 0 \quad (7.1)$$



Şekil 7.2 Gaz perdesinin oluşumu.

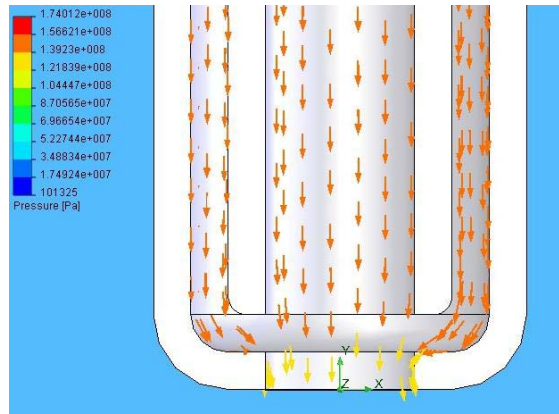
7.2 Gaz Perdesinin Oluşabilirliğinin İncelenmesi

Yöntemin çalışabilirliğini, yani gaz perdesinin oluşup oluşmadığını görebilmek için SOLIDWORKS tasarım programının, FLOWWORKS akış analizi modülü ile tek nozul üzerinde farklı gaz akım değerleri ile çalışmalar yapılmıştır. İlk denemelerde nozulun ucu düz tasarlanmıştır, gaz perdesinin oluşmadığı görülmüştür. Sonraki



Şekil 7.4 İç ve dış nozuldan birim zamanda akan kütleler eşit (15 g/sn).

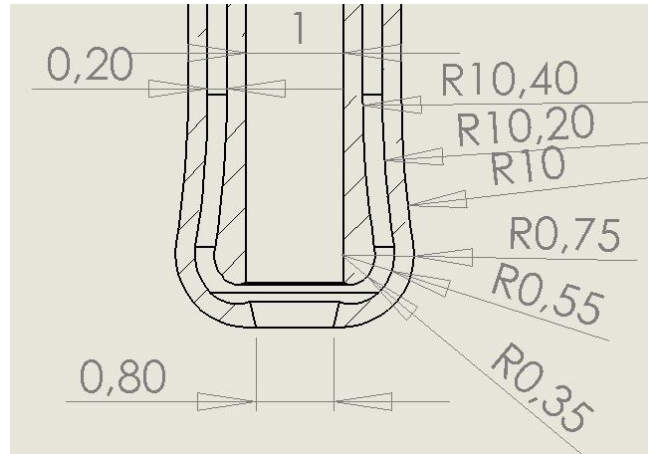
İç ve dış nozullardan akan kütlelerin eşit olması durumunda, iç nozuldan akan kütlenin dış nozuldan akan kütleyi yenerek dış nozul içine doğru akması, dış nozuldan yeterli kütle akması durumunda iç nozulda gaz perdesinin oluşabileceği fikrini güçlendirmiştir. Bu nedenle dış nozuldan akan kütle artırılarak yeni bir deneme yapılmıştır. Şekil 7.5'te iç nozuldaki kütle akımını yenebilmek için dış nozuldan bu kütlenin 10 katı kütle, saniyede 150 gram akıtılmıştır. Bu kez dış nozuldaki kütle akımı iç nozuldaki kütle akımını yenmiştir. Ancak her iki kütle akımı da nozul ağzından dışarıya akmıştır. Hatta dış nozuldaki kütle akımı dışa doğru akmaya başlayınca vakum etkisi oluşturmuş, iç nozuldaki kütlenin daha hızlı akmasına neden olmuştur. Akımın bu şekilde gerçekleşmesinin olası nedenleri gazların alçak basınca doğru hareket eğiliminin olması ve dış nozuldaki kütle akımının iç nozuldaki kütle akımını karşılama açısının olmamasıdır. Sonuçta dış nozuldaki kütle akımı iç nozuldan akan kütlenin 10 katı olmasına rağmen gaz perdesi oluşma eğilimi görülmemiştir.



Şekil 7.5 Dış nozuldan birim zamanda akan kütle, iç nozuldan birim zamanda akan kütlenin 10 katıdır (150 g/sn).

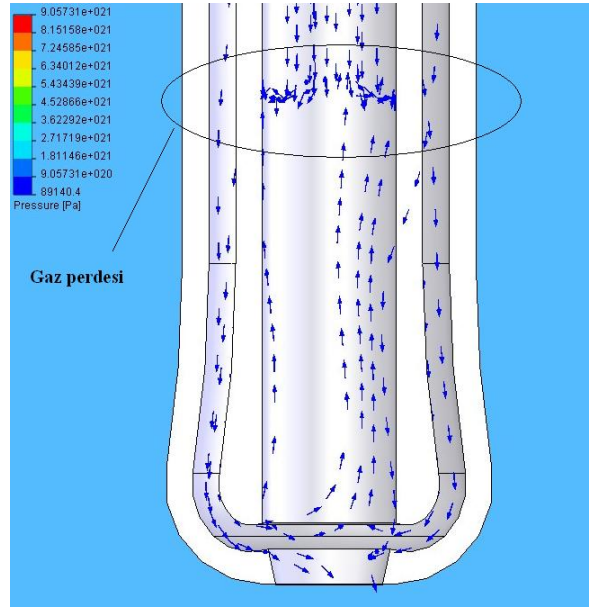
7.2.2 Şişkin uçlu nozulda gaz perdesi oluşumu

Düz uçlu nozulda gaz perdesinin oluşmamasının tasarımdan kaynaklandığı düşünülerek tasarım değiştirilip denemeler yapılmıştır. Düz uçlu nozulda iç ve dış nozullardan eşit kütle aktığında, iç nozuldaki akım dış nozuldaki akımı yenmiştir. Bu durum, tasarım iyileştirildiği takdirde iç nozuldaki akımın yenilebileceği şeklinde yorumlanmıştır. Dış nozuldan daha düzgün ve iç nozuldaki akımı karşılayabilecek bir akım elde etmek için daha büyük yarıçapla köşeler yuvarlatılmıştır. İç nozulun iç çapı büyütülerek 1 mm yapılmış, dış nozulun çıkış ağzı çapı sabit tutularak 0,8 mm bırakılmıştır. Sonuçta Şekil 7.6'daki gibi şişkin uçlu bir nozul oluşmuştur. Düz uçlu nozuldakine benzer şekilde, denemelerde iç nozuldan saniyede 15 gram (15 g/sn) kütle aktığı kabul edilerek dış nozuldan gelen farklı miktarlardaki kütle akımına verdiği tepki incelenmiş, gaz perdesinin oluşabilirliği görülmüştür.



Şekil 7.6 Şişkin uçlu nozul.

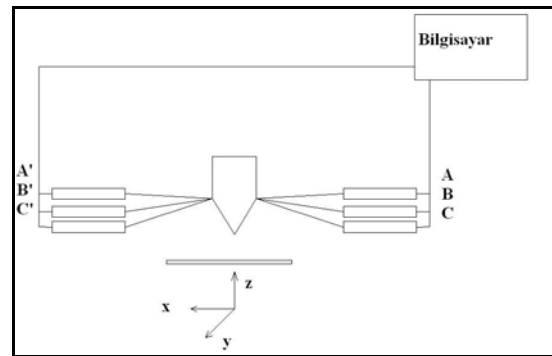
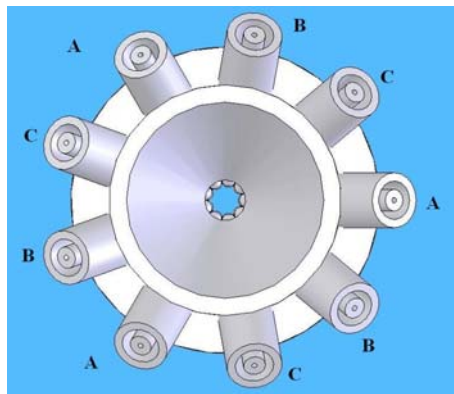
Şişkin uçlu nozulla yapılan denemelerde bu kez dış nozuldan, iç nozuldakinden çok büyük bir kütle akıtılarak, gaz perdesinin oluşabilirliği incelenmeye başlanmıştır. Dış nozuldan, iç nozuldakinin 1000 katı, saniyede 1,5 kg kütle akıtıldığından Şekil 7.7 elde edilmiştir. Dış nozuldaki kütle akımı iç nozulda, nozul çıkış ucundan 3,6 mm yukarıda bir gaz perdesi oluşturarak iç nozuldaki kütle akımını durdurmuştur. Tasarımda yapılacak iyileştirmelerle yöntemin çalışabilirliği görülmüştür.



Şekil 7.7 İç nozulda gaz perdesinin oluşması.

7.3 Gaz Perdeli Nozulla Toz Besleme

Şişkin uçlu nozulda toz akımının, nozul çıkış ucundan 3,6 mm yukarıda durdurulabildiği görülmüştür (Şekil 7.7). Taşıyıcı gövdeye; alt tabakadan 4 mm yüksekte, 6 mm çapında bir daire merkezi etrafına, alt tabaka ile $52,5^\circ$ açı ile Şekil 7.7'deki dış nozulun boyutlarında ancak 9 adet nozul yerleştirilebilmiştir. Bu 9 adet nozul, 3 farklı toz (A, B, C) için 3'erli gruplar halinde dağıtılmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.8 A, B ve C tozları için 3'erli gruplar halinde paylaşılmış nozullar.

A', B' ve C' perde oluşturacak gazı nozullara besleyen, bilgisayar denetimli pompalardır. A tozu akarken, A' pompasından akan gaz durdurulur. B' ve C'

pompaları çalışır. B tozu akarken B', C tozu akarken C' pompasından akan gaz durdurulur, diğer pompalar çalışır.

8. SONUÇ

Hızlı prototipleme yöntemlerinden LENS'te farklı malzemelerden oluşan karmaşık bir nesneyi, örneğin çok küçük boyutlardaki bir robotu, bir cep telefonunu başka bir işleme gerek kalmadan üretebilmek için özel bir nozul tasarımına ihtiyaç vardır. Gaz perdeli nozul bu türden üretimleri gerçekleştirebilmek için tasarlanmıştır. Yöntemin iyileştirilmesinin gerektiği açıktır. Ancak ilk sonuçlar nozulun şekline, gaz ve toz akma oranlarına bağlı olarak nozulun çıkış ağzından belirli bir yükseklikte toz akımını engelleyebilecek bir gaz perdesinin oluşabileceğini göstermiştir.

Yöntemin getirdiği önemli üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Nozulun ucunda herhangi hareketli bir parça yoktur. Böylece parçaların hareketinden kaynaklanabilecek titreşim, statik elektrik yüklenme, adhezyon, vb. etkiler en aza indirilmiş olur. Mekanik parçaların tam kapanmama, sıkışma gibi sorunlarıyla karşılaşmaz.
- Dış nozuldan düşük akımla gaz geldiğinde bu gaz akımı tozun kararlı akışına katkıda bulunur. Yani gaz perdeli nozullarla istenildiği zaman toz akımı durdurulabilmekle birlikte istenildiği zaman toz akımının yığılma noktasına odaklanması kolaylaştırılabilir.
- Tasarlanan nozulun yapısı, eksensiz (off-axis) nozullar gibi kullanılabilmesine olanak sağlar. Bu durumda her nozuldan farklı bir toz beslenebilir. Çalışılan toz sayısı arttırılabilir. Alaşımli parçalar da üretilebilir.

9. ÖNERİLER

Hızlı prototipleme yöntemleri, özellikle LENS (Laser Engineered Net Shaping) geleceğin imalat yöntemleridirler. Birbirinden farklı malzemeleri yan yana yığabilecek bir nozul geliştirmenin LENS (Laser Engineered Net Shaping) yönteminin önünü açacağı, hatta bilinen imalat tekniklerinde köklü bir değişiklik doğuracağı açıktır. Çünkü, artık tasarımın bir kısıtı kalmayacaktır. Ancak bu noktada 2 temel sorunla karşılaşılacaktır. Bunlardan birincisi farklı malzemelerin farklı erime noktalarının ve soğuma hızlarının bulunmasıdır. Prototipleme sırasında işlem hızı ve diğer işlem değişkenleri bu nokta dikkate alınarak belirlenmelidir. İkincisi ise Şekil 7.3 ve Şekil 7.6 incelendiğinde görülecektir ki nozulun çapı 3 mm'nin altındadır. 0,2 mm et kalınlığı olan ve doğru gaz akımını sağlamak için karmaşık bir tasarım gerektiren nozulların tasarımı da, imal edilmesi de güçtür. Nozulun imal edileceği malzemenin de önemi göz ardı edilmemelidir. Zira çalışma bölgesi oldukça sıcaktır. Tez konusu, geliştirilen yöntem ve nozul tasarımı üzerine çalışmak isteyen araştırmacıların bu 2 temel sorunu dikkate almaları gerekir.

10. KAYNAKLAR

1. Griffith M. L., Ensiz M. T., Puskar J. D., Robino C. V., Brooks J. A., Philliber J. A., Smugeresky J. E., Hofmeister W. H., Understanding the microstructure and properties of components fabricated by Laser Engineered Net Shaping (LENS), Office of Scientific & Technical Information, (2000).
2. Erzincanlı F., Ermurat M., Comparison of the direct metal laser fabrication technologies, <http://bettamachinetools.com.au/dls/comparisonmetallasersintering.pdf>
3. Pham D. T., Gault R. S., A Comparison of Rapid Prototyping Technologies, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38, (1998), 1257-1287
4. Wohlers T., Executive Summary Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Report 2001, Wohlers Associates., 2001
5. Yevko V. Park C.B., Zak G., Coyle T.W., Benhabib B., Cladding formation in laser-beam fusion of metal powder, rapid prototyping journal, volume 4, number 4, (1998), 168-184, ISSN 1355-2546
6. Groover M. P., Rapid Prototyping, Fundamentals of Modern Manufacturing 3/e, John Wiley and Sons Inc., 2007
7. ME 350 – Ch 34 – Rapid prototyping, Mechanical Science and Engineering Courses, University of Illinois, 2009
8. Pop A. P., Ungur P., Mihoc G. B., The aspects about rapid prototyping system, Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008
9. Luo R. C., Fellow, IEEE, Chen C. C., Tzou J. H., The development of a direct metallic rapid prototyping system, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, L.A., 2004
10. Griffith M. L., Keicher D. M., Atwood C. L., Romero J. A., Smugeresky J. E., Harwell L. D., Grene D. L., Solid Free Form Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 12-14 1996
11. Plourde R., Laser Engineered Net Shaping – LENS Advances for component repair improving readiness, Aerospace and Defense Business Development, OPTOMECH, www.jdmag.wpafb.af.mil/d2t1%201530%20%20lens.ppt
12. Smith W. F., Çeviren: Kınıkoğlu N. G., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
13. Kummailil J., Process Models For Laser Engineered Net Shaping (LENS), Worcester Polytechnic Institute, Manufacturing Engineering. May 2004
14. Pratt P. R., Analysis of thermo-mechanical characteristics of the Lens™ process for steels using the finite element method, Mississippi State University, Mechanical Engineering, Dec 2008
15. Wang L., Felicelli S., Influence of process parameters on the phase transformation and consequent hardness induced by the Lens™ process., Materials Processing Fundamentals, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society), 2007

16. Theiler C., Seefeld T., Sepold G., Deposition of graded metal matrix composites by laser beam cladding, BIAS Bremen Institute of Applied Beam Technology, Germany.
17. Krishna B. V., Bandyopadhyay A., Surface modification of AISI 410 stainless steel using laser engineered net shaping (LENS), *Materials and Design*, 30, (2009), 1490–1496
18. Wang L., Felicelli S., Analysis of thermal phenomena in LENSTM deposition, *Materials Science and Engineering A* 435–436, (2006), 625–631
19. Hofmeister W., Wert M., Smugeresky J., Philliber J. A., Griffith M., Ensiz M., Investigating solidification with the Laser Engineered Net Shaping (LENSTM) process. *JOM.*, vol. 51, no. 7, July 1999
20. Wang L., Felicelli S., Gooroochurn Y., Wang P.T., Horstemeyer M.F., Optimization of the LENS® process for steady molten pool size, *Materials Science and Engineering A* 474, (2008) 148–156,
21. Yang N., Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding, *Optics & Laser Technology*, 41, (2009), 94–98
22. Bontha S., Klingbeil N. W., Kobryn P. A., Fraser H. L., Effects of process variables and size-scale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures, *Materials Science and Engineering, A*, 513–514, (2009), 311–318
23. Schneider M, Laser cladding with powder effect of some machining parameters on clad properties, Ph.D. Thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands, March 1998
24. http://home.att.net/~castleisland /len_int.htm, Castle Island's Worldwide Guide to Rapid Prototyping web site
25. <http://www.optomec.com/>, OPTOMECH web site
26. <http://sandia.gov/media/lens.htm>, Sandia National Laboratories web site
27. <http://www.tms.org>, The Minerals, Metals and Materials Society web site
28. Zhang F., Chen J., Tan H., Lin X., Huang W., Composition control for laser solid forming from blended elemental powders, *Optics & Laser Technology*. ELSEVIER, (2009), 601–607
29. Unocic R.R., DuPont J.N., Process efficiency measurements in the Laser Engineered Net Shaping Process, *Metallurgical And Materials Transactions*, Volume 35B, February 2004, 151
30. Chauhan A. P. S., Moran W., White H. J., Pulsed laser deposition of silicon carbide on heat resistant materials, *International Symposium of Research Students on Material Science and Engineering*, December 20-22 2004
31. Unocic R.R., DuPont J.N., Composition control in the direct laser deposition process, *Metallurgical And Materials Transactions*, Volume 34b, August 2003, 439
32. Collins P.C., Banerjee R., Banerjee S., Fraser H. L., Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys, *Materials Science and Engineering A* 352 (2003) 118-128

33. Beal V. E., Erasenthiran P., Hopkinson N., Dickens P., Ahrens C. H., The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13-Cu materials, *Int J Adv Manuf Technol*, (2006), 30, 844–852
34. Balla V. K., Bose S., Bandyopadhyay A., Keck, W. M. Laser surface modification of Al–4Cu–1Mg alloy for enhanced thermal conductivity, *Optics and Lasers in Engineering*, 47, (2009), 651–655
35. Watkins K. G., Achieving The Potential Of Direct Fabrication With Lasers, *Proc 3rd International Conference on Laser Assisted Net Shaping (LANE 2001)*, 28–31 August 2001, pp 25 – 38
36. Xiong Y., Smugeresky J. E., Ajdelsztajn L., Schoenung J. M., Fabrication of WC–Co cermets by Laser Engineered Net Shaping, *Materials Science and Engineering, A*, 493, (2008), 261–266
37. Domack M. S., Baughman J. M., Development of nickel-titanium graded composition components, *Rapid Prototyping Journal*, Volume 11, Number 1, 2005, 41–51
38. Weisheit A., Backes G., Gasser A., Wissenbach K., Poprawe R., Powder Injection: The Key to Reconditioning and Generating Components Using Laser Cladding, www.ilt.fraunhofer.de/ilt/pdf/eng/paper1232.pdf
39. Gusarov A. V., Smurov I., Ecole Nationale d'Inge'nieurs de Saint-Etienne (ENISE), DIPI Lab., 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne, France, Direct laser manufacturing with coaxial powder injection: Modelling of structure of deposited layers, *Science Direct*, 253, (2007), 8316 – 8321
40. Li Y., Yang H., Lin X., Huang W., Li J., Zhou Y., The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming, *Materials Science and Engineering, A360*, (2003), 18 – 25
41. Liu J., Li L., Direct fabrication of thin-wall parts by laser cladding, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 8, No.1, 2006
42. Fearon E., Watkins K. G., Optimisation of layer height control in direct laser deposition, *23rd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics (ICALEO 2004)*, 597, Vol. 97, 2004
43. Watkins K. G., A method of layer height control in direct laser fabrication of 304L stainless steel (904), *22nd International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics (ICALEO 2003)*, 595, Vol. 95, 2003
44. Henry M., Fearon E., Watkins K. G., Dearden G., The laser cladding of hastalloy to critical surfaces of stainless steel components, *LASer papers - recent papers of the Laser group, Department of Engineering University of Liverpool*, 20th ICALEO 2001, Vols 92 -93, (2001), 631-640
45. Costa L., Vilar R., Reti T., Deus A. M., Rapid tooling by laser powder deposition: Process simulation using finite element analysis, *Science Direct*, 53, (2005), 3987–3999
46. Costa L., Reti T., Deus A. M., Vilar R., Simulation of layer overlap tempering kinetics in steel parts deposited by laser cladding, *2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing*, April 2002

47. Fearon E., Watkins K. G., Sharp M. C., Increasing laser coupling using proactive layer height control in direct laser deposition, *Rapid Manufacturing, Laser Assisted Net Shape Engineering* 4, 2004
48. Schlienger E., Dimos D., Griffith M., Michael J., Oliver M., Romero T, Smugeresky J, Near Net Shape Production of Metal Components using LENS, OSTI, Sandia National Laboratories, March 16 1998
49. Wang L., Felicelli S. D., Craig J. E., Thermal modeling and experimental validation in the LENSTM Process, Center for Advanced Vehicular Systems, www.cavs.msstate.edu/publications/1387FY07_Quarter%201%20Report.pdf
50. Davis S. J., Watkins K. G., Dearden G., Fearon E., Zeng J., Optimum deposition parameters for the direct laser fabrication (DLF) of quasi-hollow structures, *Photon Conference Manchester*, Institute of Physics, September 2006
51. Geda H., Kaplan A., Powell J., Melt-Solid interactions in laser cladding and laser casting, *Metallurgical And Materials Transactions, B Volume*, 36b, October 2005
52. Kong C. Y., Carroll P. A., Brown P., Scudamore R. J., The effect of average powder particle size on deposition efficiency, deposit height and surface roughness in the direct metal laser deposition process, *14th International Conference on Joining of Materials*, 29 April - 2 May 2007
53. Pinkerton A. J., Lin Li, Multiple-layer laser deposition of steel components using gas- and water-atomised powders: the differences and the mechanisms leading to them, *ScienceDirect*, 247, (2005), 175–181
54. Plati A., Tan J. C., Golosnoy I. O., Persoons R., K. van Acker, Clyne T. W., Residual stress generation during laser cladding of steel with a particulate metal matrix composite, *Advanced Engineering Materials*, No.7, 2006.
55. Choi S. H., Cheung H. H., A versatile virtual prototyping system for rapid product development, *Science Direct*, 59, (2008), 477–488
56. Giuliani V., Freiheit T., Gu P., Design and Realization of Multi-Material and Multi-Process Deposition Method, www.cden.ca/2005/2ndCDEN-conference/data/10092.pdf
57. Fesler J. R., Merz R., Nickel A. H., Prinz F. B., Weiss L. E., Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing, <http://www-rpl.stanford.edu/user/files/papers/sff1996a.pdf>
58. Prof. Dr. Ing. Andreas Gebhardt, Short Course on Rapid Prototyping, www.fh-aachen.de/index.php?id=3509&no_cache=1&file=724&uid=7977
59. Luo R. C., Chang C. L., Pan Y. L., Tzou J. H., Rapid tooling using laser powered direct metallic manufacturing process, *IEEE*, 0-7803-9252-3/05
60. Keicher D., Laser Engineered Net Shaping LENStm Phase II, OPTOMECH Corp.
61. Xiao-feng S., Wei-jun L., Tian-ran W., Fang-you H., Yan-li L., Laser Engineered Net Shaping Technology, *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2004, 8 (Suppl.): 26 - 29
62. Yang S., Julian R.G. Evans, Flow rate of metal powders at reduced and elevated air pressure, *ScienceDirect*, 154, (2005), 95 – 98

63. Pinkerton A. J., Lin Li, Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, 2004
64. Pan H., Liou F., Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process, *Journal of Materials Processing Technology ELSEVIER*, (2005), 230–244
65. Dai K., Shaw L., Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders, *ScienceDirect*, 52, (2004), 69–80
66. Marcus R. D., Leung L. S., Klinzing G. E., *Pneumatic Conveying of Solids*, 1990
67. Hensinger D. M., Ames A. L., Kuhlmann J. L., Motion planning for a direct metal deposition rapid prototyping system, *International Conference on Robotics & Automation*, IEEE, April 2000.
68. Luo R. C., Fellow, IEEE, Liu C. M., Li Z. W., Layer manufacturing using optimum feed control to manufacture functionally graded structure, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Nov. 5-8 2007
69. Laeng J., Stewart J. G., Liou F. W., Laser metal forming processes for rapid prototyping - a review, , Taylor and Francis, *INT. J. PROD. RES.*, 2000, VOL. 38, NO. 16, 3973 – 3996
70. Freitag D., Wohlers T., Philippi T., Rapid prototyping: State of the art, *Manufacturing Technology Information Analysis Center*, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA431535&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>

11. ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Candemir ÖZDEMİR 1980 yılında Mardin’de doğmuştur. 1998’de Kocaeli Anadolu Lisesi’ni, 2006’da Kocaeli Üni. Müh. Fak. Makine Mühendisliği bölümünü, 2009’da Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde Tasarım ve İmalat Mühendisliği Yüksek Lisans eğitimini bitirmiştir.

12. EKLER

A

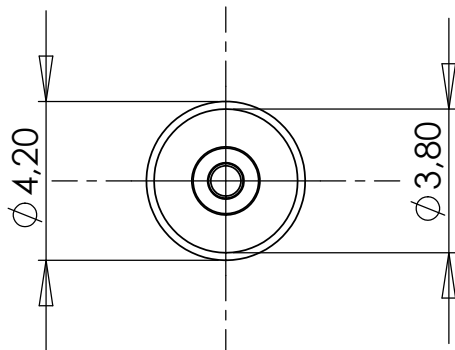
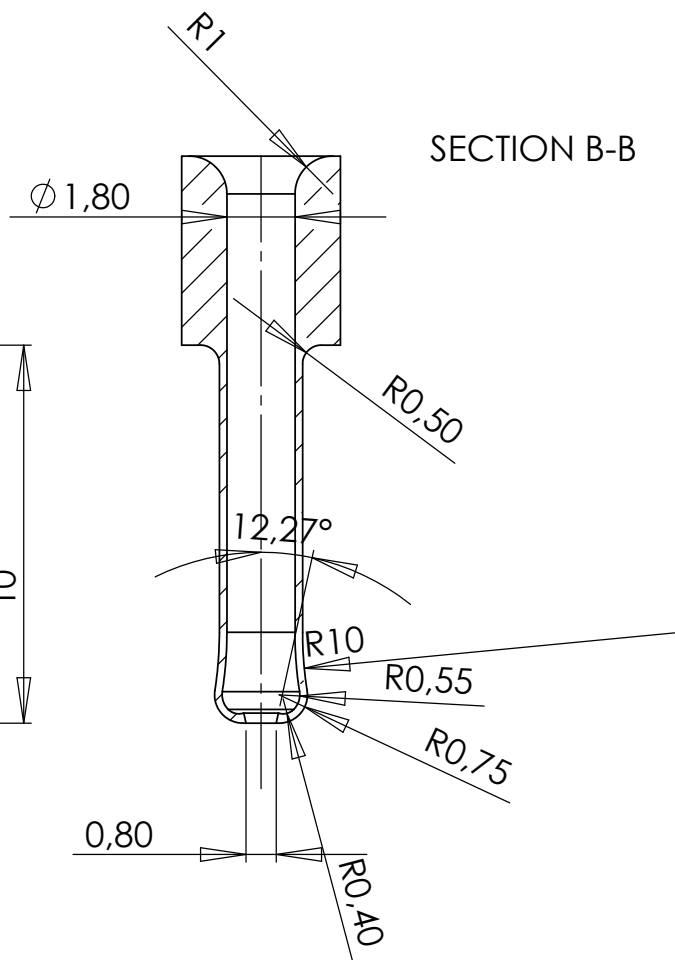
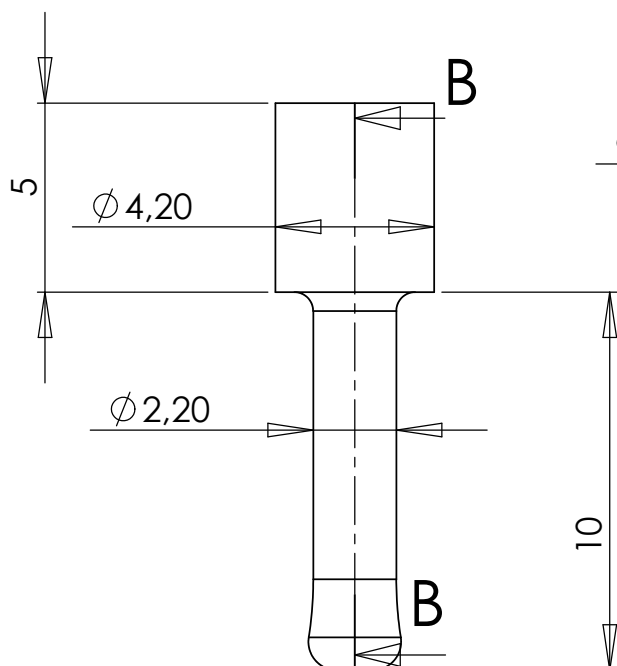
B

C

D

E

F



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

DWG NO.

Dış nozul

A4

SCALE:5:1

SHEET 1 OF 1

WEIGHT:

MATERIAL:

1

2

23

△

A

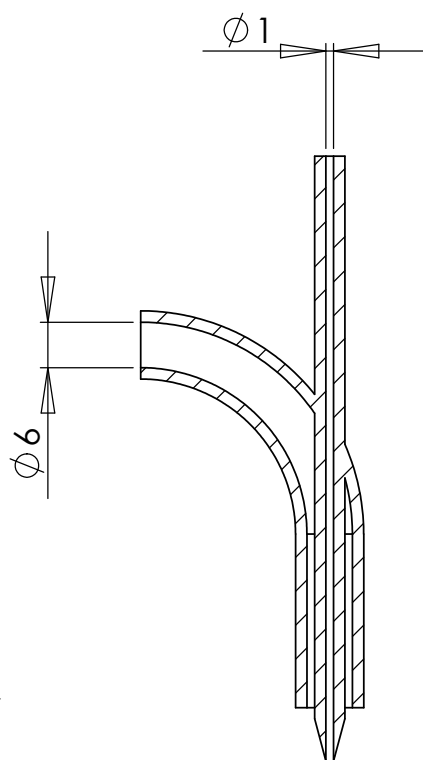
B

C

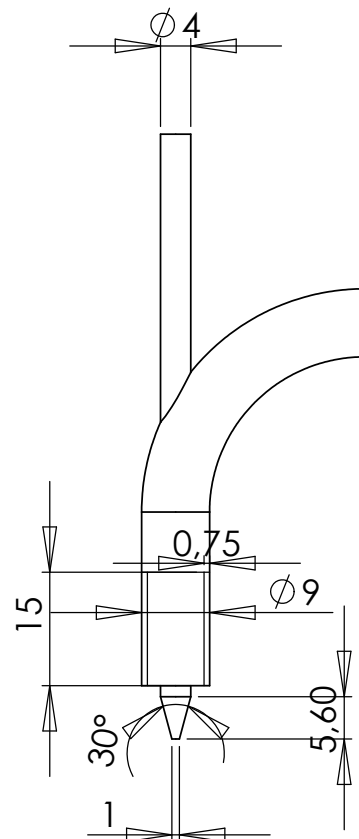
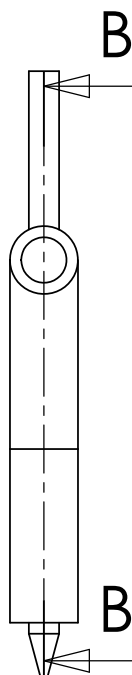
D

E

F



SECTION B-B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

TITLE:

DRAWN

NAME

SIGNATURE

DATE _____

CHK'D	
-------	--

APPV'D

MFG

Q.A

MATERIAL:

DWG NO.

Toz ve gaz taşıyıcı

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1