KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZERLİ DOĞRUDAN METAL PARÇA İMALATI SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ, ÜRETİLEN PARÇA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE SİSTEMİN OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Mehmet ERMURAT

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Danışman: Prof. İbrahim UZMAN

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZERLİ DOĞRUDAN METAL PARÇA İMALATI SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ, ÜRETİLEN PARÇA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE SİSTEMİN OPTİMİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Mehmet ERMURAT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26.05.2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.07.2009

Tez Danışmanı Prof. İbrahim UZMAN		II. Danışman Doç.Dr. Fehmi ERZİNCANLI .....
Üye Doç.Dr. Metin USTA	Üye Y.Doç.Dr. A.Armağan ARICI	Üye Doç.Dr. Cüneyt OYSU .....
Üye Y.Doç.Dr. Murat MAKARACI		Üye Y.Doç.Dr. Ali ORAL .....

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünyada hızlı prototipleme ve hızlı imalat üzerine yapılan çalışmaların çok ileri düzeye ulaştığı günümüzde özellikle lazerli yığma işlemi yapan teknolojilerin çok farklı alanlarda kullanılma imkânları da göz önünde bulundurulduğunda stratejik öneme sahip olduğu görülmektedir. Maalesef ülkemizde şu ana kadar genel olarak hızlı prototipleme sistem tasarımı ve geliştirme üzerine çalışan çok sınırlı sayıda araştırmacının olduğu lazerli teknolojileri geliştirme bakımından ise yok denecek kadar az sayıda olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasında kontrolünün çok zor olduğu eşzamanlı malzeme beslemeli lazerli yığma teknolojisi üzerine çalışmaya odaklanarak bir sistem geliştirme süreci yaşanmış ve sistemin proses optimizasyonu üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmanın ülkemize faydalı olması ve başka araştırmalara örnek olmasını diliyorum.

Öncelikle benden her türlü yardımlarını ve sabırlarını esirgemeyen değerli danışman hocalarım Prof. İbrahim Uzman ve Doç.Dr. Fehmi Erzincanlı'ya, lazer ve optik konusunda görüş ve bilgilerine başvurduğum Prof.Dr. Necati Ecevit hocama, tez esnasında çeşitli konularda yardımlarına başvurduğum değerli hocalarım Doç.Dr. Metin Usta, Yrd.Doç.Dr. Armağan Arıcı, Yrd.Doç.Dr. M. Ali Arslan hocalarıma ve her türlü konuda fikirlerimi paylaşıp görüş alışverişinde bulunduğum değerli arkadaşım Bülent Kaya'ya, Dr. Aytekin Polat'a ve diğer mesai arkadaşlarım ve hocalarıma, yüksek hızlı kayıt kamerası ile çekim yapmama yardımcı oldukları için Starteknik firmasına, paslanmaz çelik tozlarını sağladıkları için Sandvik-Osprey firmasına ve dönem dönem bölümümüzde teknisyenlik görevlerini yürüterek deney setinin kurulmasında emekleri geçen değerli arkadaşlarım Selahattin Uysal ve Ercüment Gedik'e, mikrosertlik testlerini yapmama yardımcı olan tekniker Adem Şen ve ayrıca ve özel olarak bana manevi desteklerini esirgemeyen bütün aile fertlerime ve yakınlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER ve KISALTMALAR viii
ÖZET ix
İNGİLİZCE ÖZET x
1. HIZLI PROTOTİP VE İMALAT SİSTEMLERİ 1
1.1. Hızlı Prototip Teknolojisi Prosesi 3
1.2. Lazerli Metal Parça İmalatı Sistemleri 6
1.2.1. Önceden malzeme beslemeli sistemler 6
1.2.2. Eşzamanlı malzeme beslemeli sistemler 8
2. SİSTEMİN TEORİK ALTYAPISI VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI 11
2.1. Lazerli Yığma Sisteminde Parça Oluşturma Prosesi 11
2.2. Lazerli Yığma Sistemini Etkileyen Ana Değişkenlere Göre Literatür Çalışması 14
2.3. Lazerli Yığma Sisteminin Çeşitli Olanakları 31
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR İÇİN DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI 33
3.1. Lazer Ünitesi 33
3.2. CNC Tezgâh 36
3.3. Nozul 37
3.4. Optik Ünitesi ve Mekanik Aksamı 40
3.4.1. Optiklerle ilgili bazı teorik bilgiler 40
3.4.2. Fiber optik kablo ve taşıyıcı mekanik aksamı 43
3.4.3. Mercekler ve taşıyıcı ayarlı mekanik aksamı 48
3.4.4. Lazer ışınının odak bölgesinin (bel geometrisi) gerçek profilinin oluşturulması 51
3.4.5. Optik sistemdeki optik kayıplar ve giderilmesi 56
3.4.5.1. Optik kayıpların tespiti 56
3.4.5.2. Optik kayıpların giderilmesi 57
3.5. Toz Besleyici Ünitesi 58
3.6. Gaz Besleme Ünitesi 61
3.7. Proses Odası 62
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 63
4.1. Yapıyı Oluşturan Tek Bir Yığın Hattının Deneysel Tasarım Teknikleri Kullanılarak Optimizasyonu 63
4.1.1. Amaç 63
4.1.2. Deneysel tasarım prosedürü 63
4.1.3. Faktöriyel tasarım 64
4.1.4. Taguchi metodu 64
4.1.5. Tepki yüzeyi metodu 65
4.1.6. Değişken ve sabit tutulan faktörler 66
4.1.7. Deneyin faktöriyel tasarımı 69

4.1.8. Deneyin yapılış metodu 69
4.1.9. Numunelerin ölçülmesi ve sonuçların grafiksel olarak gösterilmesi 71
4.1.10. Toz davranışı ve hızının ölçülmesi 73
4.1.11. Sonuçların grafiksel ifadesi 76
4.1.12. Faktöriyel tasarım ve taguchi analizi 76
4.1.12.1. Yığın genişliği ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları 77
4.1.12.2. Yığın yüksekliği ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları 81
4.1.12.3. Ağırlık ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları 84
4.1.13. Sonuçların değerlendirilmesi 87
4.1.13.1. Tepki değerleri bakımından sonuçların tartışılması ve irdelenmesi 87
4.1.13.2. Ana faktörler bakımından sonuçların tartışılması ve irdelenmesi 90
Odak uzaklığının etkisi: 90
4.2. Tek Bir Yığın Hattının Metalografik Olarak İncelenmesi 94
4.2.1. Numune hazırlama ve mikroyapı gözlemi 94
4.2.2. Sonuçların Değerlendirilmesi 102
4.3. Tek Sıralı, Çok Katmanlı İşlem İle İnce Yapılı Parçaların Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi 107
4.3.1. Deneyin tanımı 107
4.3.2. Deney parametreleri 108
4.3.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi 109
4.3.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi 110
4.3.5. Parçaların mekanik olarak incelenmesi 114
4.3.6. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi 115
4.4. Çok Sıralı, Tek Katmanlı Bir Yapının Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi 119
4.4.1. Deneyin tanımı 119
4.4.2. Deney parametreleri 120
4.4.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi 121
4.4.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi 122
4.4.5. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi 124
4.5. Çok Sıralı, Çok Katmanlı İşlem İle 3 Boyutlu Parçaların Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi 125
4.5.1. Deneyin tanımı 126
4.5.2. Deney parametreleri 126
4.5.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi 127
4.5.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi 128
4.5.5. Parçaların mekanik olarak incelenmesi 130
4.5.6. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi 131
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 134
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 139
6.1. Sonuçlar 139
6.2. Öneriler 140
KAYNAKLAR 142
EKLER 150
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER 154
ÖZGEÇMİŞ 155

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil.1.1. Hızlı Prototip ve Üretim Sistemlerinin İşlem Zinciri……..…. 3
Şekil 1.2. (a)Tasarlanan katı model (b) katı modelin .stl veri formatına çevrilmiş hali……..……..……. 4
Şekil 1.3. Oluşturulacak olan parçanın katmanlarının ayrılmış ve birleştirilmiş halindeki görüntüsü…….……..... 5
Şekil 1.4. Önceden beslemeli lazerli metal parça imalatı sistemleri [12]…… 7
Şekil 2.1. a) Eşeksenli beslemeli nozul b) Yandan beslemeli nozul [8].....…….. 11
Şekil 2.2. Duvar arkasında kalan kısımlarda geometri oluşmaması problemi….. 12
Şekil 2.3. (a) Lazerli yığma işleminin şematik gösterimi, (b) Tek katmanlı yapı. 13
Şekil 2.4. Çok sıralı yığma işlemi ile ilgili boyutsal büyüklükleri.....……. 13
Şekil 2.5. Farklı tarama şekilleri[8]..…… 13
Şekil 2.6. Tek sıralı yığın mikroyapısının temsili gösterimi……. 15
Şekil 2.7. Pürüzlü yüzeye etki eden lazer ışınının çoklu yansıma ile tekrar soğurulması…….……. 17
Şekil 2.8. Demir malzemeye etki eden lazer ışının yoğunluk-derinlik grafiği..... 18
Şekil 2.9. Enerjinin proses modeli üzerindeki transfer şekilleri [8]……... 19
Şekil 2.10. Tozlar arasında yaşanan çoklu yansıma ile ışının tekrar soğurulması. 21
Şekil 2.11. Tozların altlığı gölgelemesi olayı…… 22
Şekil 2.12. Toz besleme miktarı ile gölgeleme oranı arasındaki ilişki [46]…….... 23
Şekil 2.13. a) Gauss ışın profiline sahip ışının 3 boyutlu yüzeyle temsili [47], (b) Farklı profillere sahip ışınların profili [29]…….……... 24
Şekil 2.14. Lazer ışın yoğunluğu grafiği- yarıçap bölgesinin gösterimi……..…. 25
Şekil 2.15. Yığın geometrisi ile lazer ışını dağılım grafiği arasındaki ilişki…..... 25
Şekil 2.16. (a) Kolonsal tanecik yapısı, (b) Eş eksenli tanecik yapısı…..…… 29
Şekil 3.1. Nd:YAG Lazeri Rezonatörünün iç kısmının resmi……... 34
Şekil 3.2. Nd:YAG Lazeri Rezonatörünün Şematik Gösterimi…….… 34
Şekil 3.3. Nd:YAG Lazer ile He-Ne lazer ışınlarının eşeksenli olarak çakıştırılması…… 35
Şekil 3.4. CNC Tezgâhın eksenlerinin hareket yönlerinin şematik gösterimi….. 36
Şekil 3.5. CNC Tezgaha ait bir fotoğraf…… 37
Şekil 3.6. Nozulun şematik gösterimi…… 39
Şekil 3.7. Nozulun montaj yapılmış bir fotoğrafı……..…… 39
Şekil 3.8. Optik eleman düzeninin şematik gösterimi…… 40
Şekil 3.9. Kırınım-Yansıma Diyagramı (Fresnel Yansıması) [87]……... 41
Şekil 3.10. Fiber optik kabloda yaşanan optik transfer [88].……..…… 42
Şekil 3.11. Fiber optik kabloya ait şematik bir görüntü [91]…….…… 43
Şekil 3.12. Parlatılmış fiber optik kablonun uç görüntüsü (500:1 büyütme) ve bağlayıcısı…….……... 44
Şekil 3.13. Lazer-Fiber bağlayıcısına ait fotoğraflar…….…… 46
Şekil 3.14. Lazer-Fiber bağlayıcısı teknik resmi……... 47
Şekil 3.15. 4 eksen hareket kabiliyetine sahip bağlayıcı konumlandırıcı platformun şematik görüntüsü…….……... 47

Şekil 3.16. Fiber optik kablo ayarlama esnasında görünür hale getirilen lazer ışını…….. 48
Şekil 3.17. Odaklanan ışının bel kısmı……..... 50
Şekil 3.18. Odaklama hata şekilleri……... 51
Şekil 3.19. Bıçak kenarı metodu için yapılan ölçümlerin şekli……. 53
Şekil 3.20. Ölçüm sonuçları…….. 54
Şekil 3.21. Gerçek odak uzaklığının (Z0) konumu……..…. 55
Şekil 3.22. AR kaplaması Dalga boyuna göre geçirgenlik oranları [94]……... 58
Şekil 3.23. İki bileşenli toz besleme ünitesinin şematik görüntüsü……...… 60
Şekil 3.24. İki bileşenli toz besleme ünitesine ait bir fotoğraf……...… 60
Şekil 3.25. Gaz Besleme Ünitesi……...……. 62
Şekil 4.1. Lazerli doğrudan metal parça imalatı sistemi nozul kısmı……..... 67
Şekil 4.2. Deney faktörlerinin oluşturduğu kombinasyon……. 67
Şekil 4.3. Yığının geometrik ölçü bilgisi……...…… 68
Şekil 4.4. Lazer ışını odak bel bölgesi, odak uzaklığının aldığı farklı değerler……..... 70
Şekil 4.5. 2 Nolu deneye ait numunenin resmi…….. 71
Şekil 4.6. Bir yığının üstten mikroskop ile büyütülerek (100:1) elde edilen bir görüntüsü……. 71
Şekil 4.7. Mikroskop ile alınan görüntü üzerinde yığın genişliği ölçümü……. 72
Şekil 4.8. Yığın yüksekliği ölçümü……..……. 72
Şekil 4.9. Fotoğraflama tekniği……..... 74
Şekil 4.10. Hızlı kamera ile çekilen toz besleme işlemi……...…. 74
Şekil 4.11. Yığın genişliği, yığın yüksekliği ve yığın ağırlığı değerlerinin grafiksel gösterimi……..……. 76
Şekil 4.12. Faktörlerin yığın genişliğine direkt etkileri……. 78
Şekil 4.13 Faktörlerin yığın genişliğine etkileşimli etkileri…….……. 79
Şekil 4.14. Kontur Grafikleri (Yığın genişliği için)……..……..... 81
Şekil 4.15. Faktörlerin yığın yüksekliğine direkt etkileri……..……..... 82
Şekil 4.16 Faktörlerin yığın yüksekliğine etkileşimli etkileri…… 82
Şekil 4.17. Kontur Grafikleri (Yığın yüksekliği için)…… 84
Şekil 4.18. Faktörlerin yığın ağırlığına direkt etkileri…….……..… 85
Şekil 4.19. Faktörlerin yığın ağırlığına etkileşimli etkileri…… 85
Şekil 4.20. Kontur Grafikleri (Ağırlık için)…….……. 87
Şekil 4.21. Tek bir yığının mikroyapısının incelenmesi için kullanılacak kesitler……. 95
Şekil 4.22. Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-10mm/sn)…….……... 97
Şekil 4.23. Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-14mm/sn)…….…….…… 97
Şekil 4.24. Tanecik oluşumu (B-B Kesiti-10mm/sn)…… 98
Şekil 4.25. Tanecik oluşumu (B-B Kesiti-14mm/sn)…… 98
Şekil 4.26. Tanecik oluşumu (C-C Kesiti-10mm/sn)…… 99
Şekil 4.27. Tanecik oluşumu (C-C Kesiti-14mm/sn)…… 99
Şekil 4.28. Kademeli katılaşma (A-A Kesiti-10mm/sn)…….……. 100
Şekil 4.29. Kademeli katılaşma (A-A Kesiti-14mm/sn)……..… 100
Şekil 4.30. Kademeli katılaşma (B-B Kesiti-10mm/sn)……... 101
Şekil 4.31. Kademeli Katılaşma (B-B Kesiti-14mm/sn)…….……. 101
Şekil 4.32. Kademeli Katılaşma (C-C Kesiti-10mm/sn)…….. 101
Şekil 4.33. Kademeli Katılaşma (C-C Kesiti-14mm/sn)…….. 102
Şekil 4.34. Düşük ilerleme hızına ait katılaşma şekli…….. 104

Şekil 4.35. Yüksek ilerleme hızına ait katılaşma şekli……. 105
Şekil 4.36. Tek sıralı çok katmanlı yapının şekli ve büyüklükleri…..……. 107
Şekil 4.37. Elde edilen numuneye ait bir resim…… 109
Şekil 4.38. Elde edilen numuneye ait yan kısımdan mikroskop ile büyütülerek çekilmiş resim..……. 109
Şekil 4.39. Tek sıralı, çok katmanlı yığınların farklı seviyelerdeki genişlik değerleri (ilk yığın 0 olarak gösterilmiştir) – (A-A kesiti)……..... 110
Şekil 4.40. Tanecik oluşumu (A-A Kesiti)……... 111
Şekil 4.41. Tanecik Oluşumu (B-B Kesiti)…….……..…... 112
Şekil 4.42. Düz bir yüzey üzerine oluşturulmuş tek katmanlı yığının A-A kesiti görüntüsü…….……..……... 112
Şekil 4.43. Ardışık iki yığının oluşumu sonucu ortaya çıkan mikro yapı…… 113
Şekil 4.44. Farklı katmanlardaki yığın kesiti farklılığı…….…..……. 113
Şekil 4.45. Yapılan sertlik ölçümlerinin numaralı olarak gösterilmesi…… 114
Şekil 4.46. Beklenen ve gerçekleşen yığın yüksekliklerinin karşılaştırmalı grafiği…… 115
Şekil 4.47. Yığın geometrisinin üstten görüntüsü…….…..……. 117
Şekil 4.48. Lazer ışınının düz ve eğrisel yüzeyle yapmış olduğu etkileşim şekli 118
Şekil 4.49. Tek katmanlı, çok sıralı yapının şekli…….…….……. 120
Şekil 4.50. Tek sıra oluşturulan yığının A-A kesiti görüntüsü (Numune 2)…… 121
Şekil 4.51. Numunelerin üst yüzeyinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)... 122
Şekil 4.52. Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-Numune 1)……. 123
Şekil 4.53. Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-Numune 4)……. 123
Şekil 4.54. Numunelerin A-A kesitinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)... 124
Şekil 4.55. Çok sıralı, çok katmanlı oluşturulan numunelerin üst yüzeyinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)…….……..... 127
Şekil 4.56.Çok sıralı, çok katmanlı oluşturulan numunelerin A-A kesitinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)……...… 129
Şekil 4.57. A-A kesitinden alınan bir görüntü (Numune 1)……. 130
Şekil 4.58. Mikrosertlik ölçümü (Numune 1)…….……. 131

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Eşzamanlı malzeme beslemeli sistemlerin geliştirilmesi üzerine yapılan bazı çalışmalar……... 10
Tablo 2.1. Bazı metal malzemelerin soğurma katsayıları - A (oda sıcaklığında)…. 16
Tablo 2.2. Bazı metal malzemelerin kırılma indisleri, yansıma ve soğurma katsayıları (1.06µm Dalga boyu için) [8,29]……. 18
Tablo 2.3. Bazı toz malzemelerin yansıma ve soğurma katsayıları [30,39]……. 20
Tablo 3.1. Bıçak kenarı metodu için yapılan ölçüm sonuçları……. 53
Tablo 3.2. Her seviyede hesaplanan çap ölçüleri……..……..…. 54
Tablo 3.3. Yansıma nedeniyle yaşanan kayıplar……..…… 57
Tablo 4.1. Deneysel Kontrol Parametrelerinin tanım…….……..…. 67
Tablo 4.2. Sabit faktörler……...……..……. 68
Tablo 4.3. Tam Faktöriyel Tasarımı…….……..…….. 69
Tablo 4.4. Numunelere ait ölçülen sonuçlar ve S/N oranları…… 73
Tablo 4.5. Hızlı kayıt tekniği ile ölçülen toz hızı kombinasyonu……..….. 75
Tablo 4.6. Yığın genişliği için Varyans analizi değerleri……...…….. 77
Tablo 4.7. Tepki Tablosu (Yığın Genişliği için)…….…….. 78
Tablo 4.8. Tercih seviyeleri (Yığın Genişliği için)……..…. 79
Tablo 4.9. Tepki yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Yığın genişliği için)……..... 80
Tablo 4.10 Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Yığın genişliği için)..... 80
Tablo 4.11. Yığın Yüksekliği için Varyans analizi değerleri……..……. 81
Tablo 4.12. Tepki Tablosu (Yığın Yüksekliği için)……..… 82
Tablo 4.13. Tercih seviyeleri (Yığın yüksekliği için)…….…. 83
Tablo 4.14. Tepki yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Yığın yüksekliği için)…..…. 83
Tablo 4.15. Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Yığın yüksekliği için). 83
Tablo 4.16. Yığın Ağırlığı için Varyans analizi değerleri……..….. 85
Tablo 4.17. Tepki Tablosu (Ağırlık için)……..…… 85
Tablo 4.18. Tercih seviyeleri (ağırlık için)……..……. 86
Tablo 4.19. Tepki Yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Ağırlık için)……..… 86
Tablo 4.20. Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Ağırlık için)……..….. 86
Tablo 4.21. Tek sıralı, çok katmanlı yığın için sabit parametreler……. 108
Tablo 4.22. Kullanılan paso derinlikleri……... 108
Tablo 4.23. Yığın yükseklik değerleri (B-B kesiti)…….. 110
Tablo 4.24. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları…….. 114
Tablo 4.25. İdeal yığın yüksekliği ve paso derinlikleri dikkate alınarak oluşması beklenen yığın yükseklikleri…….……..…… 115
Tablo 4.26. Çok sıralı, tek katmanlı yığın için sabit parametreler…….. 120
Tablo 4.27. Kullanılacak olan paso genişlikleri…… 121
Tablo 4.28. Çok sıralı, çok katmanlı yığın için sabit parametreler……. 126
Tablo 4.29. Numuneler için kullanılan paso genişlikleri…… 127
Tablo 4.30. Numunelerin ölçülen yükseklikleri…….. 128
Tablo 4.31. Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Numune 1)…… 131

SİMGELER VE KISALTMALAR

BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
STL	: Stereolitografi
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
µm	: Mikrometre
A	: Soğurma katsayısı
R	: Yansıma katsayısı
T	: Geçirgenlik katsayısı
PA	: Bir malzemenin soğurduğu enerji miktarı (W)
P	: Lazerin toplam enerji miktarı
n	: Kırılma indisi (gerçek kısım)
k	: Kırılma indisi (sanal kısım)
Nd:YAG	: Neodymium-doped yttrium aluminum garnet lazeri
CO2	: Karbondioksit lazeri
λ	: Dalgaboyu
δ	: Lazer ışınının malzeme tarafından soğurulduğu derinlik
Q_L	: Lazerin toplam enerji miktarı
Q_{AS}	: Altlık tarafından soğurulan toplam enerji miktarı
Q_{AY}	: Altlıktan yansıyan enerji miktarı
Q_{TS}	: Toz partikülü tarafından soğurulan enerji miktarı
Q_{TY}	: Toz partikülünden yansıyan enerji miktarı
r	: Lazer ışını orta ekseninden yanal uzaklığı
I(r)	: Lazer ışınının r uzaklığındaki yoğunluğu
I_0	: Lazer ışını orta eksenindeki yoğunluğu
W_0	: Lazer ışını spot yarıçapı
θ_g	: Gelen ışın açısı
θ_y	: Yansıyan ışın açısı
θ_k	: Kırınım yaparak geçiş yapan ışın açısı
θ_{maks}	: Lazer ışının sahip olabileceği maksimum odaklama açısı
f	: Odak uzaklığı
b:	: Odak yüksekliği
D:	: Mercek çapı
M^2	: Lazer ışını kalite parametresi

LAZERLİ DOĞRUDAN METAL PARÇA İMALATI SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ, ÜRETİLEN PARÇA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE SİSTEMİN OPTİMİZASYONU

Mehmet ERMURAT

Anahtar Kelimeler: Lazerli metal yığma, lazerli kaplama, hızlı prototipleme ve imalat

Özet: Bu çalışmada lazerli metal yığma yöntemi kullanılarak lazerli doğrudan metal parça imalatı prosesini gerçekleştiren bir sistem tasarlanıp geliştirilmiştir. Lazerli metal yığma prosesini etkileyen çok sayıda değişken mevcuttur. Bu değişkenlerden bazıları kullanılarak proses optimizasyonu yapılmıştır. Bunlar lazer ışını odak uzaklığı, spot çapı, nozul-atlık arası uzaklık, argon gazı debisi, lazer ilerleme hızı, paso genişliği, paso derinliği ve toz besleme miktarıdır. Yapılan deneysel çalışmalarda yığın genişliği, yığın yüksekliği, yığın ağırlığı, toplam yığın yüksekliği, paso genişliği ve derinliği ile ilgili durumlar gibi bazı sonuçlar irdelenmiştir. Toz hızlarını ölçmek ve farklı kombinasyonlarda gösterdiği davranışları gözlemleyebilmek için hızlı kayıt kamerası kullanılmıştır. Oluşturulan parçaların çeşitli kesitleri alınarak mikroyapıları incelenmiş ve mikrosertik testleri gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon işleminde lazerli metal yığma yöntemi ile elde edilen yapının minimum boyutlarda olması hedeflenmiştir. Küçük ölçülerde yığın büyüklüğü minimum spot büyüklüğü, büyük nozul-altlık aralığı, yüksek gaz debisi, yüksek ilerleme hızları ile oluşan kombinasyonlar kullanılarak elde edilmiştir.

Genelde, yığının mikro yapısında proses yönüne doğru yönlenmiş kolonsal tane büyümesi gözlenmiştir. Yığının altlığa yakın bölgelerinde küçük ve kolonsal tanelerin, altlığa uzak bölgelerinde ise büyük ve eş eksenli tanelerin oluştuğu gözlenmiştir.

Mikrosertlik testlerinde yavaş katılaşma hızından dolayı çok katlı oluşturulan yapıların üst kısımlarındaki sertliğin diğer kısımlara nazaran daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Düşük paso genişliği imal edilen parça yapısında yüksek yoğunluğu sağlamaktadır. Gereğinden büyük paso genişlikleri ise parça içerisinde boşlukların ve çeşitli hataların oluşmasına yol açmaktadır.

DEVELOPMENT OF LASER ASSISTED DIRECT METAL PART FABRICATION SYSTEM, INVESTIGATION OF FABRICATED PART PROPERTIES, OPTIMIZATION OF THE SYSTEM

Mehmet ERMURAT

Keywords: Laser metal deposition, laser cladding, rapid prototyping and manufacturing

Abstract: In this study, a laser assisted direct metal part fabrication system has been designed and developed by using laser metal deposition method. There are various variables affecting the processing of laser metal deposition process. Process optimization has been done using some of the variables. These are focal distance of laser beam spot, spot diameter, nozzle-substrate distance, argon gas feed rate, laser travel speed, step over, step depth, powder feed rate. Some results have been observed such as clad width, clad height, clad weight, total clad height and situations about step over and step depth while some examinations were processed. High speed camera is used to measure the speed of powder and to observe behavior of powder feed for different combinations. Microstructure examinations and micro-hardness testing of fabricated parts have been processed taking some cross-sections of the samples.

It is aimed that costructing the parts that have minimum sized dimensions fabricating by laser metal deposition method in the optimization process. Minimum clad size can be obtained by using minimum size spot diameter, larger nozzle-substrate distance, higher gas feed rate, higher laser travel speed combinations.

Generally, columnar grain growth in the direction of the processing has been monitored in the microstructure of the clad. It has been observed that small and columnar grain growth in the region nearest the substrate and large and equiaxed grain growth in the region far from the substrate in the clad.

Hardness of the upper region is lower than the other regions of the multi layered structure has been noticed in the examination of micro-hardness testing because of lower solidification speed at the top region of the structure.

Lower step over values supply high density of manufactured part structure. Higher step over values cause gaps and various defects of manufactured parts.

1. HIZLI PROTOTİP VE İMALAT SİSTEMLERİ

Bir ürünün fikirden piyasaya çıktığı zamana kadar geçen sürede bazı süreçler söz konusudur. Hayati öneme sahip olan ve çok fazla zaman gerektiren süreç ise kuşkusuz üretim sürecidir. Küresel rekabette başarılı olunabilmesi için diğer süreçlerde olduğu gibi üretim sürecinin de mümkün olduğunca kısa sürede ve düşük maliyette gerçekleşmesi gerekmektedir. Üretim sürecinin ne derece ve nasıl hızlandırılabileceği, ürünün nasıl bir ürün olduğuna bağlıdır. Fakat bir tasarım ve sonrasında bir imalat süreci gerektiren ürünlerin üretim süreçleri benzerlik arz eder. Tasarımı yapılan bir ürünün imalat safhasına geçilebilmesi için prototipleme sürecini de tamamlaması gerekmektedir. Prototipleme süreci ürünün tasarım süreci içerisinde kabul edilir. Ürünün tipine, parça sayısına ve karmaşıklığına bağlı olarak prototipleme süreci klasik yöntemlerle yapılacak olursa çok uzun süreleri gerektirebilmektedir. Son 20 yıldır yaşanan teknolojik gelişmelere paralel olarak bu süreci çok hızlı geçirmeye olanak tanıyan Hızlı Prototip (Rapid Prototyping) sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler sayesinde Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) programları ile modellenen parçalar çok kısa süre içerisinde ve tamamen otomatik bir şekilde fiziksel olarak imal edilebilirler.

Hızlı Prototip teknolojileri ile her hangi bir fiziksel parça geleneksel imalat metodlarından olan keserek malzeme çıkarma metodunun aksine malzemelerin katman katman birbirleri üzerine istiflenmesi ve birbirlerine yapıştırılarak birleştirilmesi ile oluşturulur. Bazı sistemlerde katmanları oluşturan tabakalar küçük küçük malzemelerin kesit alan bilgisine bağlı olarak birbirleri ile belirli şekillerde birleştirilmesi ile bazılarında ise levha halindeki malzemelerin kesit alan bilgisine göre kesilmesi ve üst üste istiflenmesi ile elde edilir. Söz konusu olan işlem adımları bakımından bu sistemler katmanlı imalat (Layered Manufacturing) sistemleri olarak adlandırılmışlardır [1].

Hızlı Prototip teknolojileri bu günkü pazarda önemi giderek artan bir teknolojidir [2]. Tasarım sürecinin çok erken aşamalarında çok hızlı bir şekilde prototip sağlayarak tasarımcının erken karar vermesini sağlayan Hızlı Prototip sistemleri sayesinde orijinal bir tasarımın sağlanmasının yanı sıra optimum kalıp ve üretim yöntemlerinin seçiminde de çok önemli bir rol oynamaktadır.

Kullanılan sisteme ve imal edilecek parçanın büyüklüğüne bağlı olarak birkaç saat gibi çok kısa bir süre içerisinde tasarlanmakta olan ürünün fiziksel model olarak üretilmesi ile tasarımcı ve ürün geliştirme sürecinde karar verici konumunda olan diğer kişiler gerçek parça üzerinde daha gerçekçi değerlendirmeler yaparak daha orijinal tasarımlar ortaya koyabilmektedir. Çünkü tasarımcı o ana kadar kendisi için tamamen sanal bir görüntüden başka bir şey ifade etmeyen tasarımını çok kısa bir süre içerisinde fiziksel bir parça olarak eline alabildiğinden dolayı hem düşüncelerini daha doğru bir şekilde değerlendirebilmekte hem de eğer varsa eksikliklerini ve hatalarını hızlı bir şekilde düzeltebilme imkânı bulmaktadır.

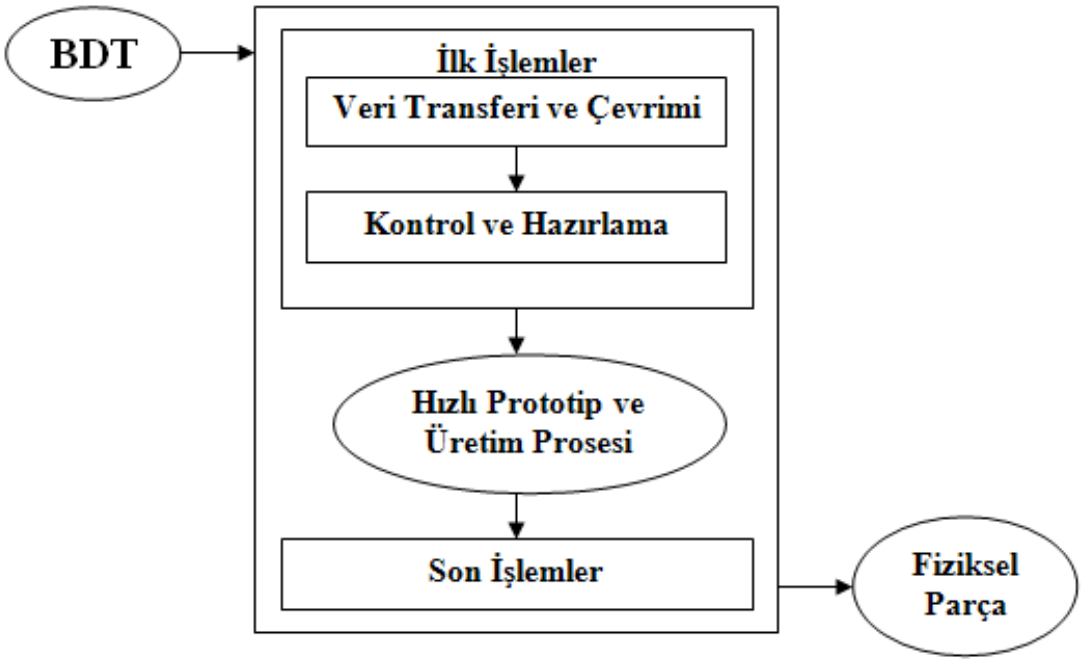
Kullanılan sistemin sunduğu avantajlara göre elde edilen modeller üzerinde görsellik-estetik, ölçüsel doğruluk, çoklu parçaların uyumluluğu, üretilebilirliği, işlevselliği, takıp-çıkarılabilirliği, montaj edilebilirliği ve sökülebilirliği gibi testler ve incelemeler yapılabilmektedir. Dahası özellikle tek işlemde çok sayıda parça oluşturmaya imkân tanıyan bazı sistemlerde elde edilen modeller de hassas döküm işlemlerinde master model olarak kullanılabilmektedir [2,3].

Bu teknolojiyi dikkate alarak işletmelerine adapte eden veya bu olanaklara sahip olan yerlerle işbirliği yaparak hizmet satın alan üreticiler, hem daha kaliteli, fonksiyonel, estetik ve orijinal yapılı ürünleri üretebilme kabiliyetine sahip olmakta hem de bu başarıyı çok kısa süre içerisinde gerçekleştirebilmektedir. Bu sebeple rakiplerine oranla çok daha kısa süre içerisinde ürününü pazara çıkarmayı başaran bir üretici rekabet gücünü eline almış olmaktadır. Diğer yandan önemli oranda zaman kazancı sağlayarak yeni ürünlerin geliştirilmesinde rakiplerine stratejik üstünlük sağlamaktadır [4,5].

Hızlı prototipleme üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda daha sağlam yapılı ve daha uzun ömürlü parçaların üretilebilir hale gelmesi, özel uygulamalara yönelik bazı sistemlerin çeşitli olanaklar sunması ve az sayıda imal edilecek parçaların son ürün olarak kullanılabilir hale gelmesi gibi olanaklar bu sistemlerin Hızlı İmalat (Rapid Manufacturing) olarak adlandırılmasını sağlamıştır [6].

1.1. Hızlı Prototip Teknolojisi Prosesi

Şu anda dünyada hem ticari olan ve hem de araştırma-geliştirme aşamasında olan çok sayıda ve çeşitte Hızlı Prototipleme sistemi mevcuttur. Bu sistemlerin kendine özgü katılaştırma, katman oluşturma ve parça oluşturma prosedürleri bulunsa da genelde bütün sistemler hemen hemen aynı proses zincirine sahiptir ve katmanlı üretim tekniği felsefesine dayanmaktadır. Bu proses zinciri Şekil 1.1'de görülmektedir.



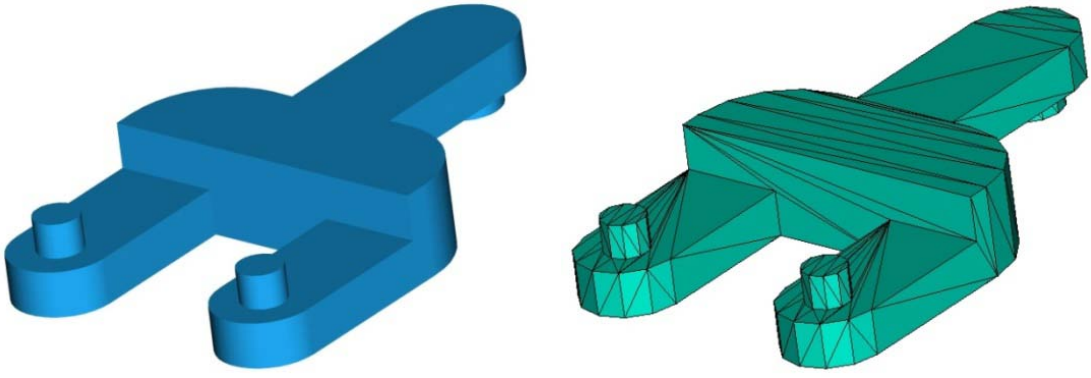
Şekil 1.1: Hızlı Prototip ve Üretim Sistemlerinin İşlem Zinciri

Prosesteki adımlar özetlenecek olursa;

✓ Öncelikle fiziksel olarak üretilecek parça Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) programları ile 3 boyutlu olarak tasarlanır, (Şekil 1.2-a).

✓ Daha sonra 3 boyutlu modelin sistemin oluşturulma metodunun zorunlu tuttuğu veri formatı olan STL formatına çevrilmesi (Şekil 1.2-b) ve üzerinde gerekli işlemlerin yapılarak hazırlanması gerekmektedir. Bu işlemler kaç adet parça üretileceği, parçaların oluşturma yönünün belirlenmesi, katman kalınlığı ve katman oluşumu ile ilgili diğer gerekli bilgilerin sistemi kontrol eden bilgisayardaki özel programına tanımlanması şeklinde olup sistemden sisteme değişiklik gösterir.

✓ Bir önceki adımda tanımlanan parametrelere göre artık parça oluşturmak için gerekli bilgiler belirlidir. Bu durumda parçayı oluşturan katmanların yükseklikleri ve parçanın sahip olacağı katman sayısı belirlenmiştir. Şekil 1.2'de gösterilen modelin oluşturulabilmesi için katmanların temsili olarak ayrı ve birleştirilmiş hali Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Bu teknikte fiziksel bir model belirli kalınlıklarda ve şekillerde olan tabakaların üst üste istiflenmesi ile elde edilir. Şekilden de görüldüğü gibi parça oluşumuna en alt katmandan başlanır ve en üst katman bitinceye kadar istifleme devam eder. Bir binanın inşasına benzediği için oto-inşa teknolojileri olarak da adlandırılır [7].



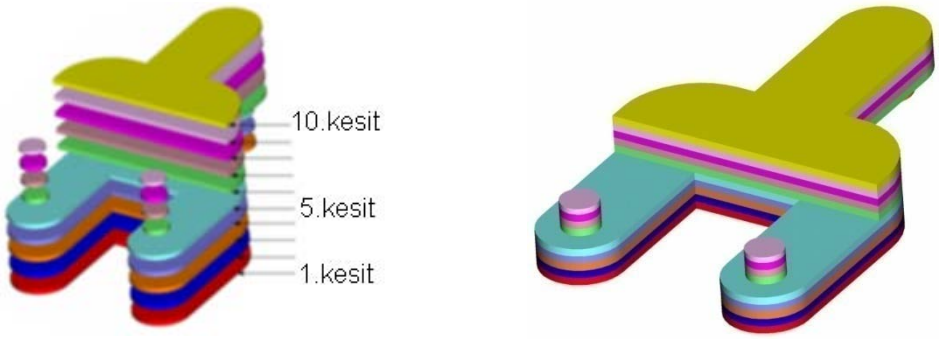
a b

Şekil 1.2: (a)Tasarlanan katı model (b) katı modelin .stl veri formatına çevrilmiş hali

Katmanların şekli teorik olarak BDT verisinin istenilen katman yükseklik değeri aralıklarıyla bütün parçayı kapsayacak şekilde kesit alınması ile belirlenir. Parçayı oluşturacak olan farklı katmanların şekilleri arasındaki farklar Şekil 1.3'te açık bir şekilde görülebilir.

Hızlı prototip imalatı prosesi oluşturulan kesit bilgisine göre en alt katmandan başlayarak en üst katmanın yapılmasına kadar devam eder.

Hızlı prototipleme sistemleri elde edilecek parça için kullanılan malzeme bakımından çeşitlendirilecek olursa toz malzeme, sıvı malzeme ve katı malzeme kullanılan sistemler olarak sayılabilir. Kullanılan malzemenin cinsi ve şekli katmanların elde edilmesini ve istifleme prosesini belirleyici bir unsurdur.



Şekil 1.3: Oluşturulacak olan parçanın katmanlarının ayrılmış ve birleştirilmiş halindeki görüntüsü

Genel olarak toz malzeme kullanılan sistemlerde plastik, metal veya seramik toz malzemelerin ya kimyasal bir yapıştırıcı ile birbirlerine bağlanması, ya da bir ısı kaynağı ile sinterleme veya eritip-katılaştırma ile birbirlerine bağlanması sonucu tek bir katmanın oluşumu gerçekleştirilir.

Sıvı malzemelerde kimyasal ve ısıl işlemle tek katman kalınlığında bir katılaştırma işlemi gerçekleştirilir. En çok kullanılanı ise fotopolimer malzemeyi lazerle kürleme işlemidir.

Katı malzemelerde ise levha şeklindeki katı malzemeler diğer katı malzemelere göre değişiklik arz eder. Levha şeklindeki katı malzemelerde tabakalar istenilen şekillerde

kesilmesi ile elde edilir. Diğer katı malzeme kullanılan sistemlerde ise genel olarak tekli veya çoklu nozullardan eriyik malzemenin fışkırtılarak belirli yerlere yığma işlemi gerçekleştirilmesi ile parça oluşumu sağlanır.

✓ Parça oluşturma işlemi gerçekleştirildikten sonra kullanılan sistemin tipine ve modele bağlı olarak elde edilen parça üzerinde yapılması gerekli olan bazı son işlemler gerçekleştirilir ve fiziksel parça hazırlanmış olur.

1.2. Lazerli Metal Parça İmalatı Sistemleri

Toz metal malzemelerinin eritilip-katılaştırılması için bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Çeşitli ısı kaynakları kullanılabilen bu sistemlerden ısı kaynağı olarak yüksek güçlü lazerlerin kullanıldığı sistemler incelenecektir.

Genel olarak iki ana grupta incelenecek olan bu sistemler arasında farklılıklar bulunsa da katman oluşturma stratejisi birbirlerine yakındır. Her iki sistemde de belirli şekle sahip katmanlar çok küçük boyutlardaki (genel olarak +45-100µm) metal tozlarının yüksek güçlü lazerle bölge bölge eritilerek yeniden katılaştırılması veya sinterlenmesi sağlanarak birbirlerine kaynaması ile gerçekleştirilir.

Bu sistemlerin gruplandırılması toz malzemenin beslenme şekline bağlı olarak yapılmıştır. Bunlar a) önceden malzeme beslemeli sistemler ve b) eşzamanlı malzeme beslemeli sistemler olarak adlandırılmışlardır [8].

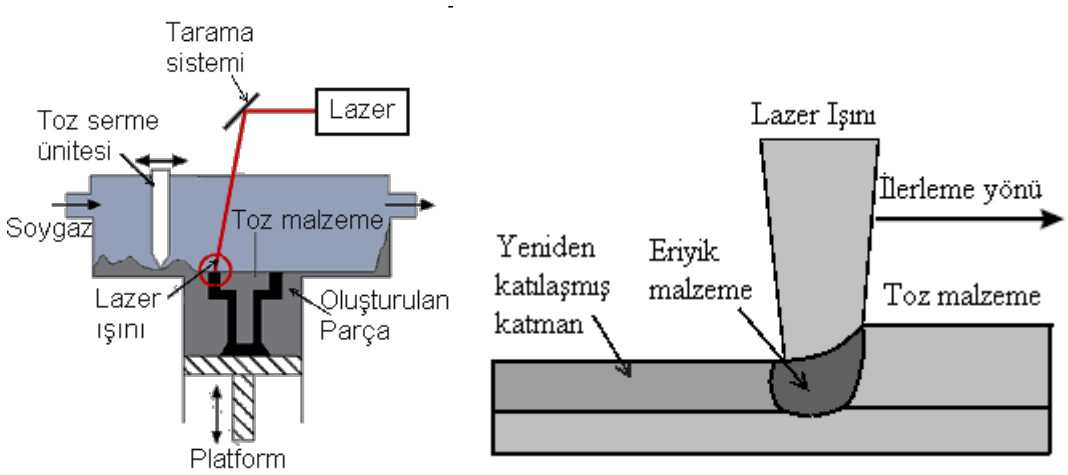
1.2.1. Önceden malzeme beslemeli sistemler

Bu sistemlerde toz malzeme bir platform üzerine istenilen katman kalınlığını elde edecek kalınlıkta serilir. Daha sonra yüksek güçlü lazer, serilen tozun üst seviyesine odaklanarak ilk katmanı belirleyen kesit alanı oluşturacak şekilde belirli bir stratejiye göre optik tarama sistemi yardımıyla gezdirilir. Lazerin etki ettiği kısımlarda bulunan toz malzemeler lazerin ısı etkisiyle tam olarak veya kısmen erimesi ve yeniden katılaşması sonucunda birbirlerine yapışırlar. Lazerin etki etmediği kısımlarda

bulunan toz malzemeler olduğu gibi kalırlar ve üst katmanların oluşumunda destek görevi görürler (Şekil 1.4).

Bir katman için yapılan işlemler bittikten sonra parçanın oluşturulduğu platformun seviyesi bir katman kalınlığında aşağı indirilir ve ikinci katmanın oluşturulması için yine bir katman kalınlığında toz malzeme ilk katmanın üzerine serilir. İkinci katmanı oluşturan kesit alanı oluşturulacak şekilde yüksek güçlü lazer tekrar ilgili katmanın kesit alan bilgisine bağlı kalarak tarama işlemi gerçekleştirir. Yine aynı şekilde lazere maruz kalan bölgelerdeki toz malzemeler eriyip katılaşarak birbirlerine ve bir önceki katmana yapışırlar. Parça oluşturuluncaya kadar bütün katmanlar için bu işlem tekrarlanır. Parçanın lazerle tarama işlemi bittikten sonra toz yığını içerisinde kalan parça alınarak yüzeylerindeki toz malzemeler temizlenir.

Bu yöntemin kullanıldığı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Aralarında bir takım farklılıklar bulunan bazı sistemler şu anda ticari olarak kullanımda ve firmalar tarafından farklı isimlerle anılmaktadırlar. Bunlar 3DSystems firmasının sahip olduğu Seçmeli Lazerli Sinterleme (Selective Laser Sintering) [9], EOS firmasının sahip olduğu Direkt Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering) [10], Concept Laser firmasının sahip olduğu LaserCusing [11], MCP firmasının sahip olduğu Seçmeli Lazerli Eritme (Selective Lazer Melting) [12] ve Trumpf firmasının sahip olduğu laserforming sistemleridir [13].



Şekil 1.4: Önceden beslemeli lazerli metal parça imalatı sistemleri [12]

Burada ismi anılmayanlar da dâhil olmak üzere aynı metodun kullanıldığı bu sistemler arasındaki farklılıklar özetle şu şekildedir.

1. Toz parçacıklarının kısmen birbirine kaynadığı sistemlerde parça oluşumu tozların sinterlenmesi ile gerçekleştirilir [14]. Bu sistemlerde asıl malzeme içerisine bağlayıcı olarak daha düşük erime sıcaklığına sahip malzemeler kullanıldığı için [15-17] hızlı prototipleme parça oluşturma işlemi sonucunda elde edilen parçanın yoğunluğu düşük olmaktadır.

Diğer yandan asıl malzeme ile bağlayıcı malzemenin karışımı ve lazer-malzeme arasındaki etkileşim farklılığı da sorun yaşanan diğer bir durumdur [18].

İşlem sonucunda imal edilen parçanın ve kullanılan sistemin gereksinimine göre ikinci işlem olarak fırında komple sinterleme, bronz infiltrasyonu [19], kumlama, polisaj ve elekto-erozyon gibi çeşitli işlemler yapılabilir [20, 21].

Fırında komple sinterleme esnasında elde edilen parçada yapıştırıcı olarak kullanılan malzeme miktarına bağlı olarak çeşitli oranlarda çekme oluşmaktadır [21].

2. Toz parçacıklarının tamamen eriyerek katılaştığı sistemlerde ise metal parçaların oluşturulması esnasında toz malzeme eritme ve yeniden katılaştırma işleminden geçirilir. Sinterlemede olduğu gibi işlemin sonunda mukavemetinin ve yoğunluğunun artırılması için fırın sinterleme işlemine tabi tutulmasına gerek kalmaz.

Elde edilen parça yüksek yoğunluktadır ve işlem sonucunda frezeleme, tornalama, kumlama, polisaj ve elektro-erozyon ile yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilebilir [11].

1.2.2. Eşzamanlı malzeme beslemeli sistemler

Eşzamanlı malzeme besleme sözünden maksat önceden beslemeli sistemlerdeki gibi tozun proses bölgesine önceden serilmesi işleminden farklı olarak lazerin yaptığı

etkileşim esnasında lazerin odaklandığı bölgeye tozun eşzamanlı olarak püskürtülerek beslenmesidir.

Yüksek güçlü lazer ışını üzerine odaklandığı altlık malzemede eriyik havuzu oluşturur ve bu havuza gaz yardımı ile beslenen toz malzemenin eriyip tekrar katılaşması ile yeni bir yapı oluşturulur [22]. Bu işlem bir yığma işlemine benzediği için lazerli yığma (laser deposition) olarak, lazerle yüzey kaplama prosesine benzediği için lazerli kaplama (cladding) olarak, erime lazerle tam olarak gerçekleştirildiği için lazerli eritme (laser fusing) olarak da adlandırılır [8, 23].

Lazerli kaplama (Laser Cladding) üzerine yapılan çalışmalar, yüksek güçlü lazerlerin ticari olarak kullanılmaya başlanması ile lazerle kaynak, kesme ve ısıl işlem gibi proseslerin uygulanmaya başladığı 1970'li yıllarda başlamıştır. 1986 yılında stereolithography prosesi ile patenti alınan Hızlı Prototip sistemleri 1990'lı yıllarda çok çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Lazerli kaplama üzerine çalışan bilim adamları o yıllarda kendi uygulamalarının Hızlı Prototip sistemlerine uygulanabilirliği üzerine çalışmaya başlamışlar ve bazı sistem ve prosesler geliştirmişlerdir [24-26]. Bu çalışmalar diğer lazerli kaplama metodu ile ilgilenen araştırma gruplarına örnek olmuş ve bu alandaki yüksek potansiyel üzerine çok sayıda çalışma başlatılmıştır.

Bazı çalışmalar ticari olarak hizmete sunulabilmişse de çoğu üzerinde halen proses iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmekte ve akademik çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları Tablo 1.1'de listelenmiştir.

Tablo 1.1: Eşzamanlı malzeme beslemeli sistemlerin geliştirilmesi üzerine yapılan bazı çalışmalar

Firma/Üniversite	Sistem adı
Precision Optical Manufacturing-Trumpf/ University of Michigan	Direkt Metal Yığma (Direct Metal Deposition)
Optomec Design/Sandia National Laboratories	Lazerli şekillendirme (Laser Engineered Net Shaping)
Aeromet	Lazerli Eklemeli İmalat Prosesi (Laser Additive Manufacturing Process-Lasform)
Los Alamos National Laboratory	Directed Light Fabrication
Integrated Manufacturing Technologies Institute of National Research Council of Canada	Lazerli Katılaştırma (Laser Consolidation)
University of Illionis of Urbana Champaign	Alüminyum Toz Sprey Prosesi (Aluminium powder spray)
University of Liverpool	Lazerli Kaplama (Laser Cladding)
Fraunhofer-Institute of Production Technology	Kontrollü Metal Üretimi (Controlled Metal Buildup)
MikroTec Mikrotechnologie mbH	Hızlı Mikro Ürün Geliştirmesi (Rapid Mikro Product Development)
University of Birmingham's School of Metallurgy and Materials	Işıkla Direk Üretim (Direct Light Fabrication)
University of Central Florida	Lazerli Direkt Hızlı Prototipleme (Laser Aided Direct Rapid Prototyping)
Institute fur Strahlwerkzeuge, The University of Stutgart	Lazerli Toz Katılaştırma (Laser Powder Solidification)
Gebze Yüksek Teknoloji Ensitüsü, Tasarım ve İmalat Müh.	Lazerli Doğrudan Metal Parça İmalatı sistemi
Loughborough University	Powder Fusion of Functionally Graded Materials

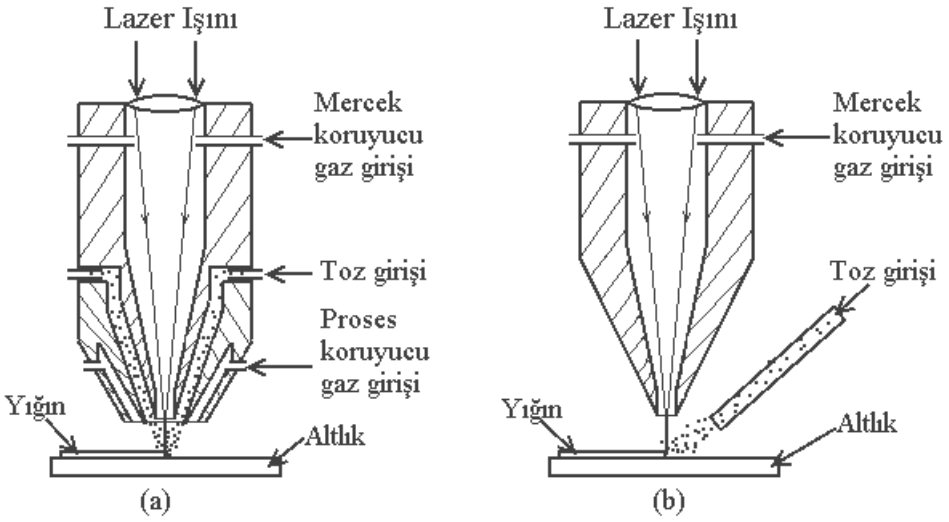
Bu çalışmada eşzamanlı toz besleme ile lazerli metal parça imalatı tekniği lazerli yığma sistemi olarak adlandırılacaktır.

2. SİSTEMİN TEORİK ALTYAPISI VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Lazerli Yığma Sisteminde Parça Oluşturma Prosesi

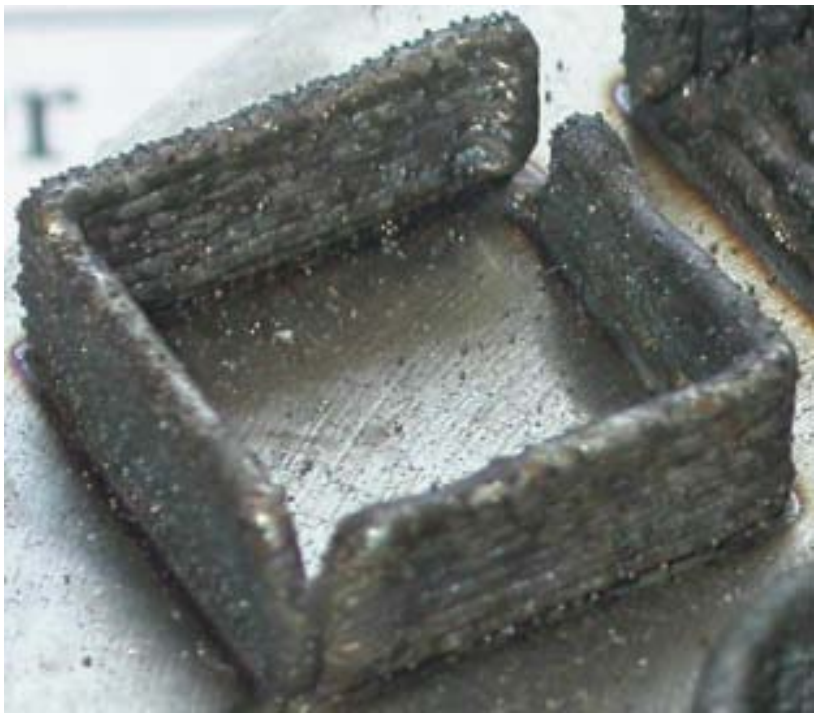
Önceden beslemeli sistemlerde toz malzeme ilk olarak platforma serilmekte ve lazer optik tarama sistemini oluşturan ayna takımı yardımı ile platform üzerinde gezdirilmekteydi.

Lazerli yığma sistemlerinde ise lazerin odaklandığı bölgeye toz malzemenin eş zamanlı olarak beslenmesi işlemi söz konusudur. Lazerin odaklandığı bölgeye ve seviyeye tozun beslenebilmesi için nozulla birlikte hareket eden bazı sistemler üzerinde çalışılmıştır. Tozun Şekil 2.1-b'deki gibi sadece yan taraftan bir veya birkaç noktadan proses bölgesine beslendiği sistemlerde lazerin farklı yönlere hareket etmesi sonucu farklı sonuçlar elde edilmekte, düzenli yapılaşma sağlanamamaktadır. En iyi sonucun alındığı tasarımlar lazerle tozun beslemesinin hareket yönünden bağımsız olarak beslenmesini ve dolayısıyla düzenli yapılaşmayı sağlayan eşeksenli beslemenin gerçekleştirildiği eş eksenli nozullu sistemlerdir, Şekil 2.1-a [8].



Şekil 2.1: a) Eşeksenli beslemeli nozul b) Yandan beslemeli nozul [8]

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tasarım ve İmalat Müh. laboratuarında geliştirilen sistemle yapılan ilk denemeler sonucunda tek taraflı besleme ile elde edilen parçadaki problem Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Yan taraftan yapılan toz beslemesi esnasında parça oluşumu esnasında oluşturulacak kısım önceden oluşturulan kısım tarafından gölgelendiği için köşe kısımlarda boşluklar ortaya çıkmıştır.

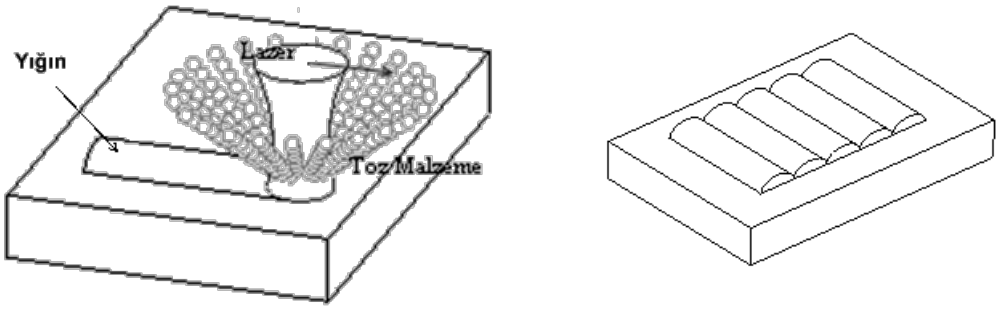


Şekil 2.2: Duvar arkasında kalan kısımlarda geometri oluşmaması problemi

Bu sistemlerde temelde altlık malzeme üzerinde lazere maruz bırakılan küçük bir bölge eriyik hale getirilir ve bu erimiş bölgeye toz malzeme beslenir. Lazerin etkisi altındaki bu bölgeye ulaşan toz malzemeler erir ve lazer başka bir bölgeye doğru hareket ettirildiğinde erimiş olan tozlar hem altlığa ve hem de birbirlerine kaynayarak yapışırlar.

Lazerin hareket ettirilmesi, ilgili kesit alan bilgisine göre bilgisayar tarafından sağlanır. Tüm kesit alanı kaplayacak şekilde tarama işlemi bittikten sonra platform seviyesi bir katman kalınlığı mesafesinde aşağı indirilir ve bir sonraki katmanın oluşturulması sağlanır. Bütün katmanlar bitinceye kadar bu işlem tekrar edilir.

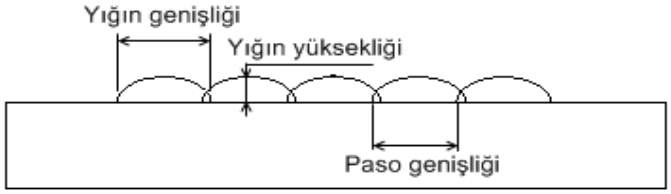
Katmanların şekli, BDT verisi üzerinde oluşturulan ilgili kesit alan şeklidir. Bir katmanın oluşturulabilmesi için, ilgili kesit alan içerisinde kalan bütün alanın çeşitli şekillerde ve paso genişliklerinde tarama işlemi uygulayarak yığma işlemi yapılır. Öncelikle belli boyutlara sahip tek boyutlu bir yığın lazerli yığma işlemi ile gerçekleştirilir. Lazerli yığma işlemi şematik olarak Şekil 2.3-a'da görülebilir.



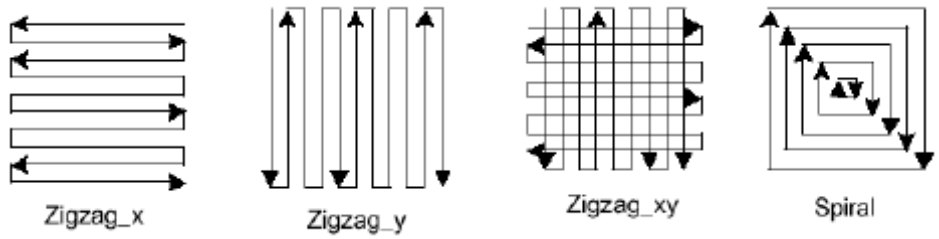
(a) (b)

Şekil 2.3: (a) Lazerli yığma işleminin şematik gösterimi, (b) Tek katmanlı yapı

Daha sonra kesit alan bilgisine ve Şekil 2.4'te gösterilen boyutsal parametrelere bağlı kalınarak tarama işlemi gerçekleştirilir. Çok sıralı şekilde taranarak yığma yapılması ile oluşturulan katman örneği Şekil 2.3-b'de görülmektedir. Şekil 2.3-b'deki düzgün dörtgene ait tarama şekline alternatif şekiller Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Çok sıralı yığma işlemi ile ilgili boyutsal büyüklükleri



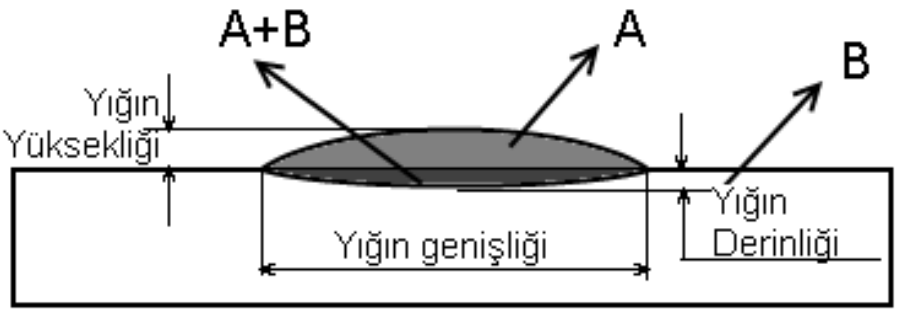
Şekil 2.5: Farklı tarama şekilleri [8]

2.2. Lazerli Yığma Sistemini Etkileyen Ana Değişkenlere Göre Literatür Çalışması

Lazerden ve küçük boyutlara sahip toz malzemenin püskürtülmesi nedeniyle hareketli bir yapıya sahip olmasından dolayı lazerli yığma sistemlerinde yüksek oranda kararsızlık ve kontrol problemi bulunmaktadır. Lazerli yığma sistemini etkileyen lazer tipi, gücü ve odak büyüklüğü, malzeme tipi ve özellikleri, malzeme şekli/yapısı, malzeme büyüklüğü/yüzey alanı ve akış miktarı, proses ilerleme hızı, gaz akış miktarı, nozul altlık arası mesafe, paso genişliği gibi çok sayıda parametre vardır. Kontrol edilebilen bu parametrelerin hepsi birbirleri ile ilişki olduklarından dolayı hepsinin ayrı ayrı başlıklar halinde ele alınmasından ziyade tek başlık altında ele alınmasının daha uygun olduğu düşünülmüştür.

Eşzamanlı beslemeli lazerli metal imalat sistemleri farklı isimlerle adlandırılsa bile hepsi temelde bir altlık malzemenin üst seviyesine odaklanan yüksek güçlü lazer ışınına metal malzemenin çeşitli şekillerde beslenmesi prensibine dayanmaktadır. Altlık malzeme üzerine etki etmekte olan lazer ışını altlık malzeme üzerinde etkidiği odak büyüklüğü, lazerin gücü ve yoğunluğu ve etki süresi ile ilişkili büyüklükte bir eriyik havuzu oluşturur. Çeşitli şekillerde beslemesi yapılan malzemenin ise gerek eriyikte oluşan yüksek enerji ile ve gerekse lazer ışınının da etkisi ile oluşturulan eriyiğin içerisine yığılması/doldurulması sağlanır. Bu süreçte lazer-malzeme etkileşimi iki farklı şekilde/bölgede gerçekleşir. Bunlar lazer ile altlık arasındaki etkileşim ve lazer ile beslenen malzeme arasındaki etkileşimdir. Besleme malzemesi olarak tel malzeme kullanılan sistemler de bulunmaktadır. Fakat bu çalışmada toz metal malzeme kullanılan bir sistem geliştirileceği için tel malzeme kullanılan sistemler göz ardı edilecektir.

Şekil 2.6'da lazerle oluşturulan bir yığının kesitinin mikroyapısının temsili bir görüntüsü bulunmaktadır. Lazerli yığma prosesinde altlık malzemede oluşturulan havuz içerisine beslenen tozların bir kısmı altlık malzeme ile eriyik halinde iken karışarak alaşım oluşturur, tozların büyük bir bölümü ise altlık ile karışmayarak karışımın üzerinde sadece toz malzemeden oluşan bir yapı oluşturur [8].



Şekil 2.6: Tek sıralı yığın mikroyapısının temsili gösterimi

Lazerli malzeme işleme prosesleri lazer çıkışındaki dalgalanma, plazma etkisi ve eriyik kısımdaki akışkan ve buharlaşma gibi durumlardan dolayı kararsızdırlar [27]. Eşzamanlı beslemeli parça oluşturma proseslerinde ise lazerle ilgili kararsızlıkların yanı sıra etkileşime giren malzeme püskürtülerek proses bölgesine beslendiği için kararsızlık doğal olarak daha fazla olmakta ve sistemin kontrolü güçleşmektedir. Bu kararsızlık elde edilen parçanın istenilen boyutta veya mekanik özelliklerde olmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden lazer-malzeme etkileşiminin öncelikle iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir.

Eşzamanlı beslemeli lazerli metal parça üretim yönteminde de diğer lazerli malzeme işlemleri yöntemlerinde olduğu gibi lazerle malzemenin etkileşimi söz konusudur. Lazer-malzeme etkileşimi öncelikle lazer tipi ile ve malzemenin optik özellikleri ile ilişkilidir.

Malzeme ile etkileşime giren lazer ışınının bir kısmı malzeme tarafından soğurulurken bir kısmı da geri yansıma yapar. Soğurma katsayısı bir malzemenin soğurduğu enerjinin lazerin toplam enerjisine oranı olarak tarif edilmektedir [28] ve malzemenin soğurma kabiliyetini tanımlar.

$$A = \frac{P_A}{P} \tag{2.1}$$

Metal gibi opak malzemeler için yansıma katsayısı ile soğurma katsayısı arasındaki ilişki şu şekildedir;

$$R=1-A \tag{2.2}$$

Burada R yansıma katsayısı, A ise soğurma katsayısıdır ve optik özellikler bakımından şu şekilde hesaplanabilirler [29];

$$R = \frac{[(1-n)^2 + k^2]}{[(1+n)^2 + k^2]} \tag{2.3}$$

$$A = 1 - R = \frac{4n}{[(1+n)^2 + k^2]} \tag{2.4}$$

Burada n kırılma indisinin gerçek kısmı, k ise sanal kısmıdır.

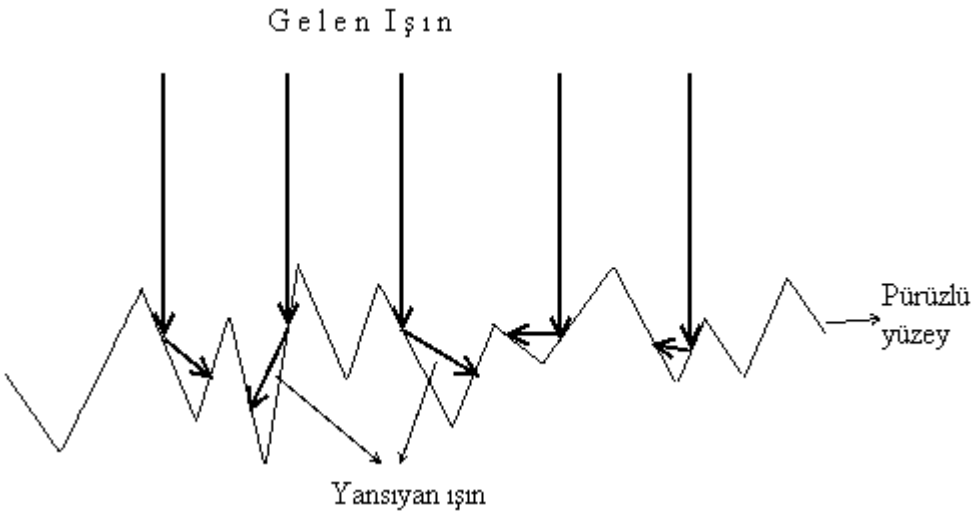
Malzemelerin lazerle işlenmesinde en önemli etken lazerin dalga boyudur. Toz malzeme kullanılarak kaplama, yığın prosesi gerçekleştirilen uygulamalarda daha çok Nd:YAG ve CO_2 lazerleri kullanılmakta ve bu lazerlerin dalga boyları (λ) sırasıyla 1.064µm ve 10.64µm'dir.

Lazer-malzeme etkileşimi bir enerji transferi şeklinde gerçekleşir. Lazer yönlendirilmiş ve yoğunlaştırılmış bir ışık kaynağı olduğu için lazerle malzeme arasındaki enerji transferi foton transferi şeklinde gerçekleştirilir [30, 31]. Kısa dalga boylarına sahip fotonlar malzemeler tarafından daha kolay soğurulurlar [8]. Dolayısıyla küçük dalga boyuna sahip olan Nd:YAG lazeri, daha büyük dalga boyuna sahip olan CO_2 lazerine oranla özellikle metal malzemeler tarafından daha fazla soğurulacaktır. Bazı çelikler için karşılaştırmalı değerler Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Bazı metal malzemelerin soğurma katsayıları - A (oda sıcaklığında) [27]

Metal	Nd:YAG (1.064µm)	CO_2 (10.64µm)
Karbonlu Çelik	0.09	0.03
Paslanmaz Çelik	0.31	0.09

Nd:YAG lazeri ve paslanmaz çelik malzeme ele alınacak olunursa paslanmaz çelik üzerine dik bir şekilde etki eden lazer ışınının sadece %31'i malzeme tarafından soğurulacak, %69'u ise geri yansıyacaktır. Tabi bu yaklaşım ideal şartlarda geçerlidir. Malzemenin yüzeyindeki kirlilik, yüzey pürüzlülüğü [32] gibi etkenler bu oranı olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle yüzeyin çok pürüzlü olduğu durumlarda malzemenin yüzeyinden geri yansıyan ışınlar yüzeyin diğer kısımları tarafından yeniden soğurulacak ve malzemenin gelen ışını soğurma miktarı artmış olacaktır [33]. Bu olay şematik olarak Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Pürüzlü yüzeye etki eden lazer ışınının çoklu yansıma ile tekrar soğurulması

Metal bir malzeme üzerine etki eden lazer ışını enerjisi δ derinliği miktarınca malzeme tarafından soğurulur [27].

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi k} \tag{2.5}$$

Bu derinlik metal malzemeler için yaklaşık olarak 10^{-2}-10^{-3}mm mertebesindedir.

Malzeme üzerine etki eden ışının etki miktarı şu formülle bulunur [27,29];

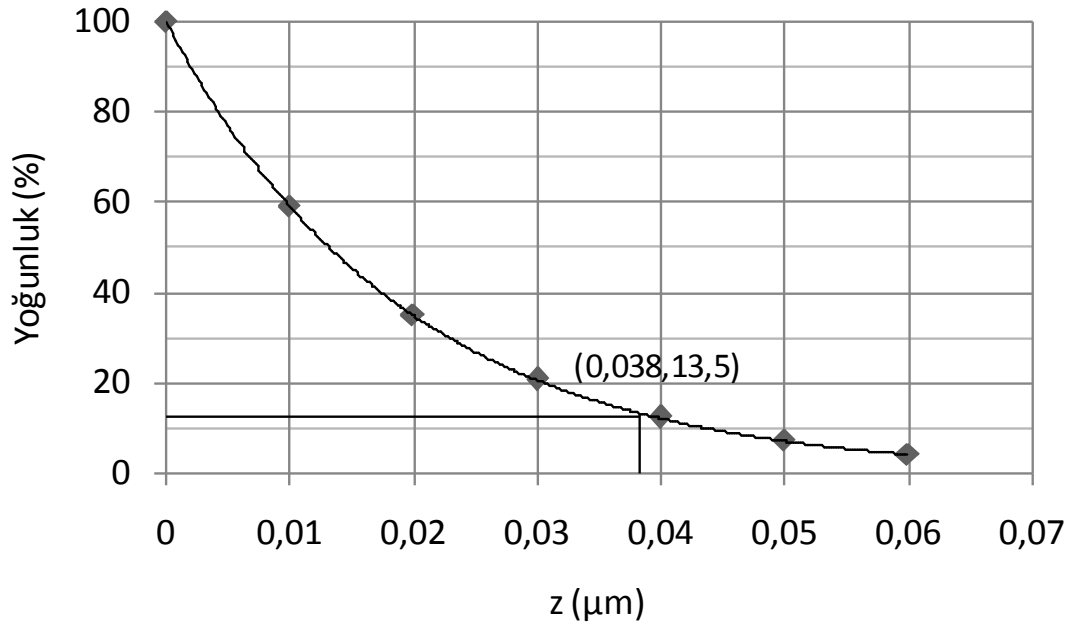
$$I(z) = I_0 e^{\left(-\frac{4\pi k z}{\lambda}\right)} \tag{2.6}$$

Burada I_0 lazerin malzemeye etki ettiği yüzeydeki yoğunluğu, $I(z)$ yüzeyden z derinliğindeki yoğunluğudur.

Tablo 2.2: Bazı metal malzemelerin kırılma indisleri, yansıma ve soğurma katsayıları (1.06µm Dalga boyu için) [8,29]

Malzeme	k	n	R	A
Alüminyum	8,5	1,75	0,91	0,09
Bakır	6,93	0,15	0,99	0,01
Demir	4,44	3,81	0,64	0,36
Nikel	5,26	2,62	0,74	0,26
Titanyum	4	3,8	0,63	0,37
Çinko	3,48	2,88	0,58	0,42
Molibden	3,55	3,83	0,57	0,43
Tungsten	3,52	3,04	0,58	0,42
Kurşun	5,4	1,41	0,84	0,16
Kalay	1,6	4,7	0,46	0,54

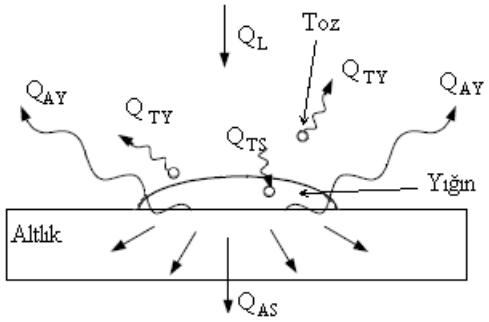
Tablo 2.2'ye göre Denklem (2.6) kullanılarak demir malzemesi için Şekil 2.8'deki grafik elde edilir. Burada açıkça görüldüğü üzere lazer ışınının yoğunluğu, eriştiği derinlik arttıkça üssel olarak azalmakta ve yüzeyden 0,038µm derinliğe ulaştığında Gaussian ışın şekline sahip olan bir lazer ışınının etkili odak çapı olarak kabul edilen yoğunluğun $1/e^2$ seviyesine (%13,5) kadar azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.8: Demir malzemeye etki eden lazer ışının yoğunluk-derinlik grafiği

Malzeme yüzeyindeki bu küçük miktardaki bölge tarafından soğurulan lazer ışınının optik enerjisi ısı enerjisine dönüşür. Böylece malzemenin ısısı artmaya başlar. Lazer-malzeme etkileşimi devam ettikçe enerji malzemenin yüzeyinden iç bölgelerine doğru yayılır ve malzemenin ısısı artmaya devam eder. Yeterli yoğunlukta etkileşim gerçekleştiğinde malzemede erime başlar. Erime miktarı lazer etkileşiminin başlangıcında maksimum seviyede olduğu ve belli bir zaman sonra bu miktarın düştüğü Xie J and Kar A tarafından yapılan çalışmada gözlenmiştir [34].

Lazerli yığma işlemlerinde lazerin etkileşime girdiği iki tip malzeme söz konusudur. Malzemelerle lazer arasındaki enerji transferi şekilleri Şekil 2.9'da görüldüğü gibi lazer hem toz malzemeye etki eder, hem de altlığa etki eder. İlk katman üzerine yapılan işlemlerde de önceki katmanlar altlık olarak adlandırılır.



Şekil 2.9: Enerjinin proses modeli üzerindeki transfer şekilleri [8]

Şekilde lazerin etkiyen toplam enerjisi QL, altlık tarafından soğurulan toplam enerji QAS, altlıktan yansıyan enerji QAY, toz partikülü tarafından soğurulan enerji QTS, toz partikülünden yansıyan enerji QTY olarak gösterilmiştir.

Proses bölgesine etki etmekte olan lazer enerjisinin bir kısmı toz malzeme tarafından bir kısmı ise altlık malzeme tarafından soğurulmaktadır.

Toz malzeme boyutlarının küçük, yüzey alanlarının çok büyük olmasından [35] dolayı lazerle etkileşimde tek bir hacme sahip olan bütün malzemeden farklı davranış

gösterecek, daha fazla enerji soğuracak [36], dolayısıyla bütün malzemeye nazaran daha düşük enerji yoğunluğu yeterli olacaktır.

Hem toz malzemenin ve hem de altlık malzemesinin lazerle yapmış olduğu etkileşim arasında ilişki kurarak minimum lazer gücü ile tek bir yığın hattının başarılı bir şekilde oluşturulabilmesi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [37, 38].

Yüzey alan etkisinin yanı sıra toz malzemelerin soğurma katsayısının da yapılan bazı çalışmalarda bütün haldeki malzemelere kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [28,30,39].

Bazı toz malzemelerin 1.06μm dalga boyuna ait elde edilen yansıma ve soğurma katsayıları Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2.3: Bazı toz malzemelerin yansıma ve soğurma katsayıları [30,39]

Malzeme	R	A
Bakır	0,41	0,59
Demir	0,36	0,64
Kurşun	0,21	0,79
Kalay	0,34	0,66
Titanyum	0,23	0,77

Ayrıca, lazer ışını toz malzemelerde bütün malzemelere oranla daha derin katmanlara nüfuz ettiği Glardonl ve diğ. (2001) [39] ve Tolochko ve diğ. (2000) [40] gibi bazı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur.

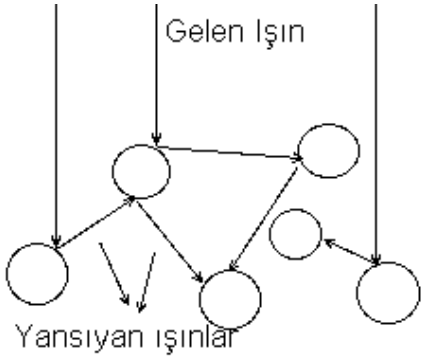
Tozların sıkıştırılıp ısıtılarak ürün elde edildiği toz metalurjisi yönteminde küçük boyutlu tozlar daha büyük boyutlu tozlara nazaran daha düşük basınç gerektirdiği [41] gibi küçük boyutlu tozlar için de daha düşük lazer enerjisi yeterli olmaktadır.

Soğurma katsayıları oranında toz malzemenin yüzeyi tarafından soğurulan lazer ışınının etkisi ile toz malzemenin dış katmanının sıcaklığı artar. Enerji etkisinin devam etmesi ile sıcaklık artışı dış katmandan tozun ortasına doğru devam eder.

Diğer yandan pürüzlü yüzeylerde yaşanan çoklu yansıma olayı toz malzemelerde iki farklı şekilde gerçekleşmektedir. İlk olarak yine bütün malzemede olduğu gibi toz malzemenin yüzeyi pürüzlü yapıda ise Şekil 2.7'de gösterilen olay toz malzemelerde de gerçekleşecektir.

Özellikle su ile atomize yöntemi ile üretilen tozlar düzensiz şekilli olmakta [36], böylece hem yüzey alanı aynı büyüklükteki küresel tozlara göre daha çok olduğundan dolayı soğurma miktarı fazla olmakta [16,36] hem de etkinin bu tür tozlarda daha fazla olacağı beklenmektedir [36].

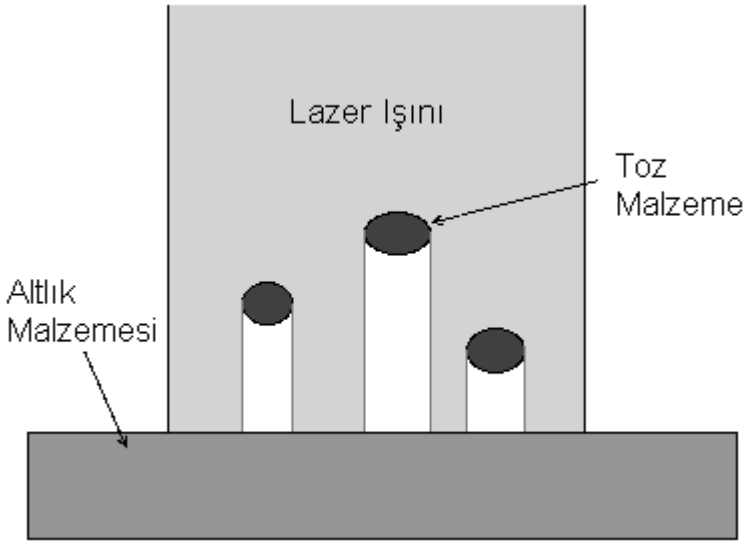
Çoklu yansımanın gerçekleştiği ikinci şekil ise tozlar arasındaki yaşanan yansımadır [28,33,42]. Şekil 2.10'da şematik olarak görülebilecek bu durum da toz malzemelerin yüzey alanı ve soğurma miktarları parametrelerinin haricinde bütün yapıdaki malzemelere oranla daha düşük enerji gereksinimine ihtiyaç duymasının bir başka nedenidir.



Şekil 2.10: Tozlar arasında yaşanan çoklu yansıma ile ışının tekrar soğurulması

Shao ve diğ. (2001) [28], toz malzemelerin soğurma katsayılarının yüksek olmasının nedeni olarak toz malzemeler arasındaki boşluklardan dolayı lazer ışınının tozlar arasında çoklu yansıma yapmasını belirtmişlerdir. Toz malzemeler ile bütün malzemeler arasında soğurma katsayıları bakımından gözlenen bu farklılık bütün malzeme tiplerinde aynı oranda olmamaktadır. Bunun temel nedeni olarak da malzemelerin atomik yapılarının rol oynadığı aynı çalışmada iddia edilmektedir.

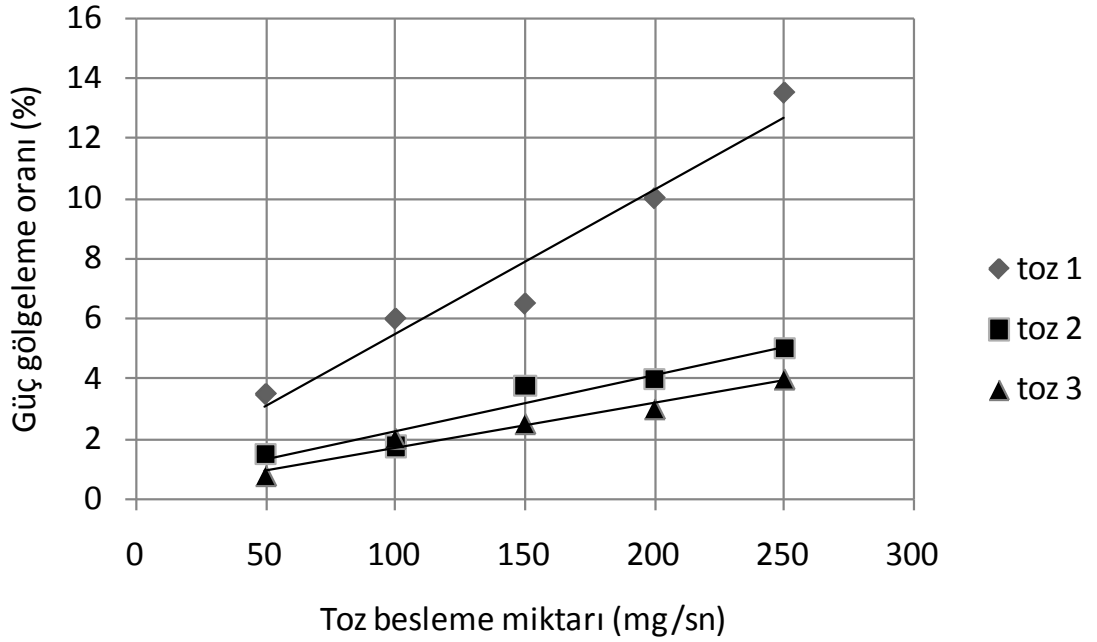
Toz malzeme üzerine gelen lazer ışını toz malzeme tarafından soğurulacaktır, fakat toz malzeme bir yandan da altlığın üzerine gelen lazer ışınını engelleyerek bir gölgeleme etkisi oluşturacaktır [43-45]. Dolayısıyla altlığın lazer enerjisini soğurma miktarı azalacaktır. Bu etki Şekil 2.11'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.11: Tozların altlığı gölgelemesi olayı

Gerçekleşen bu gölgeleme oranının, besleme miktarı ve besleme bölgesinin lazerin odak mesafesi yüksekliği ile ilişkili olduğu muhakkaktır. Yapılan bazı çalışmalarda tozun besleme miktarı arttıkça gölgeleme miktarının arttığı [45, 46], toz malzemenin hızı arttıkça gölgeleme miktarının azaldığı [43,45,46], beslenen toz malzemesi bulutunun lazer ışınının odak seviyesine yakınlaştığı ölçüde gölgelemenin arttığı [45] gözlenmiştir. Toz besleme miktarında yaşanan artışın çeşitli büyüklükteki malzemelere göre lazer gücünde oluşturduğu gölgeleme oranları Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

Diğer yandan toz partiküllerinin büyüklüğünün artması ile lazer gücünün gölgelenme oranının arttığı yapılan bir çalışmada ortaya konulmuştur [46]. Şekil 2.12'de gösterilen grafiklerde bulunan toz partikül büyüklüklükleri büyükten küçüğe doğru sırası ile toz 1, toz 2 ve toz 3 şeklindedir.



Şekil 2.12: Toz besleme miktarı ile gölgeleme oranı arasındaki ilişki [46]

Lazer ışınının yapısı da eşzamanlı beslemeli lazer yığma işlemlerinde önemli bir parametredir. TEM_{00} modunda enerji yayınımına sahip lazer ışınının enerji yoğunluğu Gauss yoğunluk eğrisine benzer yapıdadır [29,47,48], Şekil 2.13. Yani lazer ışını etki ettiği yüzey üzerinde Gauss yoğunluk eğrisine benzer bir enerji yoğunluğu dağılımı etkisi gösterir [49]. Gauss yoğunluğuna sahip lazer ışını yoğunluğu Denklem (2.7)'deki şekilde tanımlanmıştır [48].

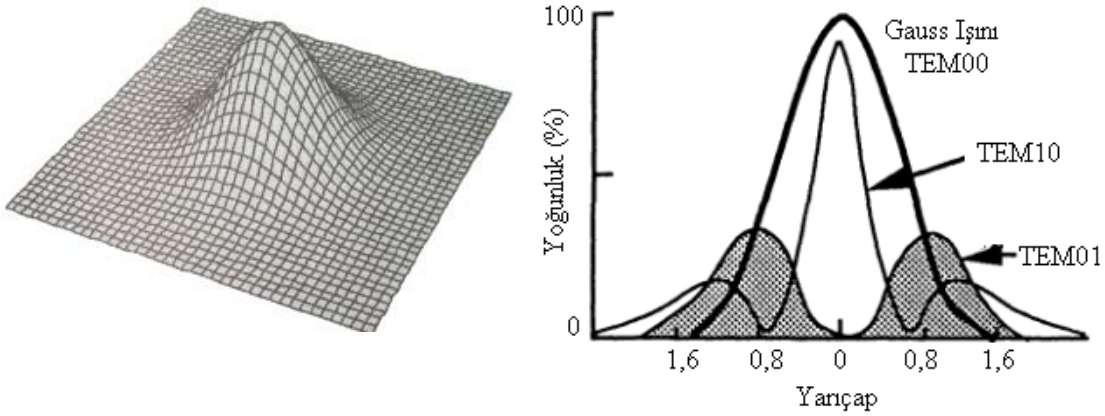
$$I(r) = I_0 e^{\left(\frac{-2r^2}{{w_0}^2}\right)} \tag{2.7}$$

Denklemde r lazer ışını orta ekseninden yanal uzaklığı, $I(r)$ lazer ışınının r uzaklığındaki yoğunluğu, I_0 ışın eksenindeki yoğunluğu ve w_0 ise ışının spot yarıçapını göstermektedir.

Gauss profiline sahip lazer ışınının yoğunluğu lazer gücüyle, spot çapıyla ve spot çapının yanal yöndeki konumu ile ilişkilidir [50].

$$P = \int_0^{w_0} I(r).2\pi r dr \tag{2.8}$$

Burada P lazer gücünü, r spotun orta ekseninden yanal uzaklığını ve w_0 ise spot yarıçapını temsil etmektedir.

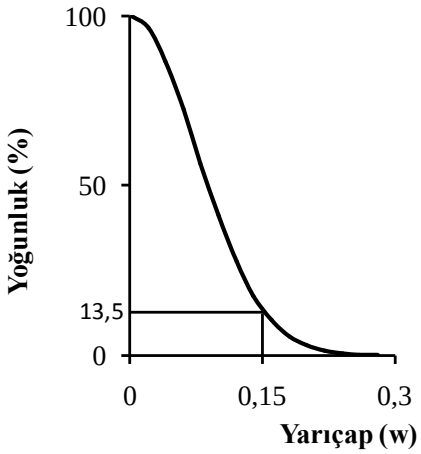


(a) (b)

Şekil 2.13: a) Gauss ışın profiline sahip ışının 3 boyutlu yüzeyle temsili [47], (b) Farklı profillere sahip ışınların profili [29]

Yüksek güçlü lazerlerde zamana bağlı olarak lazer ışını yapısında değişimler, bozulmalar yaşanabilir. Her lazerin ışın dağılımı muhakkak çıkarılmalıdır. Bunun için lazer ışın analizörleri, CCD kamera destekli bazı cihazlar olduğu gibi bıçak kenarı (knife-edge) gibi metotlarla [51] da basit bir güçmetre kullanılmak suretiyle ölçülerek çıkarılabilir. Bu metot deney seti için uygulanmış değerlerle ayrıntılı olarak anlatılmıştır (Bkz. Bölüm 3.4.4).

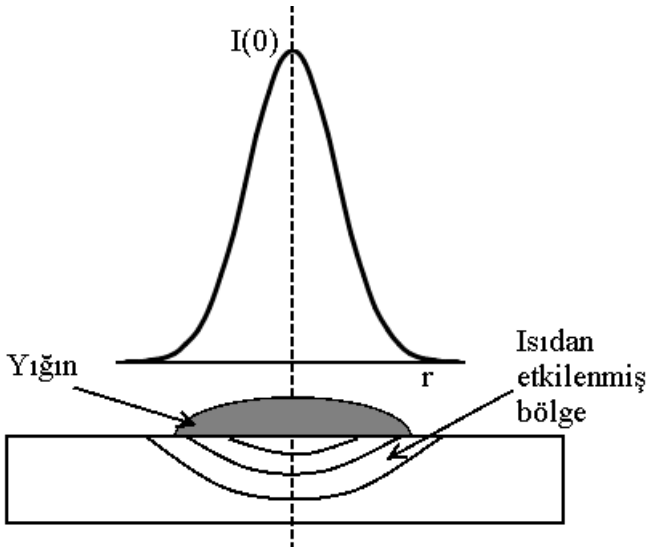
Denklem (2.7)'den ve şekillerden de anlaşılacağı gibi lazer ışınının en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan kısım r değerinin 0 olduğu yani lazer ışınının orta ekseni kısmıdır [52]. Lazer ışınının kenar kısımlarına doğru uzaklaştıkça lazerin enerji yoğunluğu düşmektedir. Maksimum enerji yoğunluğunun $1/e^2$ (r=w) seviyesi, malzeme prosesi yöntemleri bakımından enerji etkisinin yetersiz kaldığı için odak yarıçapını belirleyen sınır olarak kabul edilir, Şekil 2.14.



Şekil 2.14: Lazer ışın yoğunluğu grafiği- yarıçap bölgesinin gösterimi

Şekil 2.15'te görüldüğü üzere yığın geometrisinin orta kısmının seviyesi yüksek iken kenarlara yaklaştıkça bu yüksekliğin oransal olarak azalması lazer ışını enerji dağılımından kaynaklanmaktadır [53].

Diğer yandan beslemesi yapılan tozun da lazerle etkileştiği bölgede gauss grafiğine benzer bir dağılım gerçekleştirdiği bundan dolayı lazerin etki ettiği bölgede kenarlardan merkeze gidildikçe toz bulutu içerisinde parçacık miktarının artış gösterdiği ve merkez kısma daha fazla toz yığıldığı üzerinde duranlar da bulunmaktadır [8, 54].



Şekil 2.15: Yığın geometrisi ile lazer ışını dağılım grafiği arasındaki ilişki

Yığın geometrisini sadece toz beslemesine bağlı olarak ele alan Colaco ve diğ. [55] ve Yellup [56] çeşitli malzemeler üzerinde bazı temel parametreler arasında ilişki kurmuşlardır.

Yığın geometrisi ile ilgili olarak Lin ve Steen [57] proses bölgesinde meydana gelen ısı transferini göz önünde tutarak ve eriyik havuzu içerisinde tutunan toz miktarını tahmin ederek, yığın yüksekliği ve profilini modelleyen bir çalışma yapmışlardır.

Yığın geometrisinin yapısının yanı sıra yığın miktarını etkileyen birçok etken söz konusudur. Yığın miktarını belirleyen en önemli faktörlerden biri altlığa ve toz malzemeye etki eden lazer ernerjisi miktarıdır. Enerji miktarı arttıkça altlıkta oluşacak eriyik havuz büyüklüğü daha fazla olacak ve yığılan toz miktarı oransal olarak artacaktır. Bunun yanı sıra toz malzeme üzerine etki eden lazer enerjisinin etkisinin artması ile eriyik içerisine düşen malzeme miktarı da artacaktır.

Lazerli bir operasyonda lazer ışınının enerji yoğunluğu uygulanan enerji miktarı, lazerin ilerleme hızı ve lazer ışınının spot büyüklüğü ile orantılıdır [58,59].

$$Enerji\ Yoğunluğu = \frac{P}{\pi {w_0}^2}\frac{2w_0}{V} \tag{2.9}$$

Burada P lazer gücünü, w_0 ışın spot yarıçapını ve V ise lazerin ilerleme hızını temsil etmektedir. Denklemde bir malzemeye uygulanan enerji yoğunluğunun artırılmasının lazer gücünün artırılmasıyla ve ışın spot çapının ve ilerleme hızının ise azaltılması ile gerçekleştirilebileceği açıkça görülmektedir.

Bu konu ile ilgili Picasso ve diğ. lazer gücü, ışın çapı ve toz bulutu şekli belli olmak kaydıyla lazer ilerleme hızı ve toz miktarını kullanarak istenilen ölçüde yığın yükseklik ve genişliğini hesaplayan bir çalışma yapmışlardır [60].

Picasso ve Hoadley ise gaz hızını da göz önünde bulundurarak eriyik içerisinde oluşan ısı transferi, sıvı akışı ve gaz-sıvı fazı arasındaki ilişkiyi de hesaba katan bir model geliştirmişlerdir [61].

Toyserkani ve diğ.[62] ise sonlu elemanlar metodunu kullanarak ve toz malzemelerin altlığa etki eden lazer ışınını gölgelemesi olayını da göz önünde bulundurarak üç boyutlu süreksiz bir model geliştirmişlerdir.

Lin püskürtülen toz partiküllerinin altlık ile buluştuğu bölgede katı-katı, sıvı-katı ve sıvı-sıvı etkileşimini göz önünde bulundurarak toz malzemenin yapışması, yakalanması konusunda çalışmış ve toz büyüklüğünün, parçacık hızının ve yapışma sıcaklığının düşürülmesi ile toz malzemelerinin eriyik havuzu içerisinde daha fazla tutunacağı sonucuna varmıştır [63].

Eş zamanlı toz beslemeli lazerli yığma sisteminin nihai amacı sıra sıra elde edilen kesit alanların üst üste oluşturulması ile bir parça elde edilmesidir. Yığının yan yana oluşturulduğu veya üst üste (tek sıra ile) oluşturulduğu durumlarda ise daha önceki işlemde elde edilen yapının özelliğine göre yığın geometrisi değişiklik gösterecektir.

Bu duruma yol açan nedenler önceki yığın üzerinde fazladan kümelenen toz birikintisi, yüzey pürüzlülüğü ve küreleşmedir. Küreleşme özellikle 316 kalite paslanmaz çelik malzemede çok yoğun bir şekilde olmak üzere yığının katılaşması esnasında sıvı haldeki eriyiğin yüzey gerilimi sonucu oluştuğu yapılan bazı çalışmalarda ortaya konulmuştur [64-66]. Lazer gücü gereğinden fazla miktarda uygulandığında yüzey gerilimi de artmaktadır [65]. Yüzey gerilimine ek olarak katılaşan bölgede yaşanan çekmenin küreleşmeye yol açtığı üzerinde de durulmuştur [67].

Malzemeye gereğinden fazla miktarda uygulanan lazer enerjisi, fazla miktarda beslenen toz malzeme, yeni katılaşmış ama halen sıcaklığını koruyan yığın geometrisine tutunmayı engelleyemeyecek miktardaki toz malzemenin düşük hızı, ilerleme miktarının düşük hızı gibi nedenler toz birikintisinin oluşmasına neden olarak sayılabilir.

Yüzey pürüzlülüğünün oluşumunda toz birikintisinin etkisinin yanı sıra başka nedenler de etkili olabilir. Yüzey pürüzlülüğü komple bir yüzeyin morfolojisi ile

ilişkili olduğundan nedenlerini ele alırken pürüzlülük şekillerini sınıflandırmak gerekmektedir. Bunlar yığın oluşturma yönüne paralel yöndeki ve dik yöndeki pürüzlülükleri olarak ele alınabilir.

Yığın oluşturma yönüne paralel yüzey pürüzlülüğü, bir yığının oluşturulması esnasında lazerin yaptığı etki sonucunda eriyik hale gelen malzemenin lazerin ilerleme hızı ile orantılı olarak kademeli bir şekilde katılaşması sonucunda lazerin odak şeklini andırır izlerin ortaya çıkması ile oluşan pürüzlülüktür.

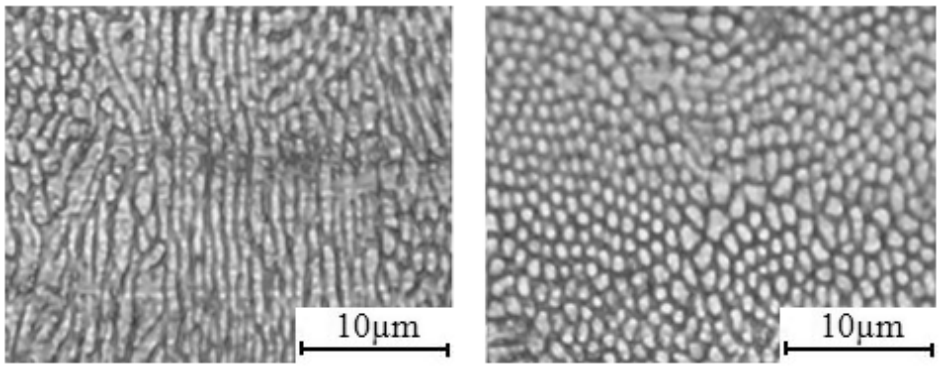
Yığın oluşturma yönüne dik durumdaki yüzey pürüzlülüğü ise yan yana çok sıralı olarak oluşturulan yapının özellikle paso genişliği parametresinin belirleyici en önemli unsur olduğu, yığınların tepe seviyesi ile ardışık durumdaki yığınların birleşme çizgisi seviyesi arasındaki mesafenin oluşturduğu pürüzlülüktür. Paso genişliği düşük tutuldukça ardışık oluşturulan yığınlar kısmen üst üste gelecek ve tepe-çukur mesafesi daha az olacağından daha düzgün bir yüzey oluşacaktır [68]. Yani üst üste binme miktarı büyüdükçe üst yüzeyde oluşan dik yöndeki yüzey pürüzlülük değeri de küçük olacaktır [69]. Üst üste binme miktarı gerekenden büyük olduğunda sonraki oluşturulan yığının bir önceki yığın üzerini kapsayıp düzensiz bir yapı oluşturacağı da göz önünde bulundurulması gereken bir konudur.

Diğer yandan Pinkerton ve Li, yüzey pürüzlülüğü ile toz malzeme besleme miktarı arasındaki ilişkiyi araştıran deneysel çalışmasında besleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de arttığını gözlemlemiştir [70].

Lazerli yığma işleminde katı durumda bulunan malzeme lazerin yüksek enerjisi yardımı ile eriyik hale getirilmekte daha sonra tekrar katılaşma gerçekleştirilmektedir. Katılaşma esnasında gerçekleşen tanecik oluşumu malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir etkendir. Özellikle metallerde ince taneli yapılara sahip parçalar sertlik, akma ve kopma gerilmesi gibi mekanik değerler bakımından daha iyi performans sergilemektedir. Bir eriyiğin katılaşması esnasında oluşan tane yapısı soğumanın gerçekleştiği kısımda ısı kaybının olduğu yönde uzanan şekilde olmaktadır [35,71].

Hatta bu özellik kullanılarak yönlendirilmiş katılaştırma metotları geliştirilmiş, bu metotlar yardımı ile türbin kanatçıkları gibi bazı özel parçaların istenilen yönde uzayan tane yapısı oluşturularak imalatı gerçekleştirilebilmekte ve bu şekilde çalışma performansını artıran özellikler kazandırılabilmektedir [72].

Belirli bir yöne doğru ısı kaybının olduğu kısımda oluşan tanecik şekli kolonsal olarak adlandırılırken ısı kaybının hemen hemen bütün yönlerde aynı olduğu kısımlarda oluşan tanecik yapıları ise eş eksenli olarak adlandırılır. Bu yapı şekilleri Şekil 2.16'da verilmiştir. Bu görüntüler deney seti ile elde edilen bir numuneden Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu ile 1000:1 oranında büyütülerek alınmıştır.



(a) (b)

Şekil 2.16: (a) Kolonsal tanecik yapısı, (b) Eş eksenli tanecik yapısı

Tanecik büyüklüğü soğuma hızı ile orantılıdır. Malzemenin katılaşması esnasında soğuma hızı arttıkça taneciğin yayılması için gereken zaman kısıtlanacağı için tanecik büyüklüğü küçülecektir. Tanecik yapılanması hızlı bir şekilde oluştuğu için malzeme içyapısı tekdüze olacaktır ve bunun sonucunda ise malzemenin gerilme dayanımı artacaktır [71, 73]. Yapılan çalışmalarda geleneksel kaynak işlemlerinde oluşan tanecik boyutuna nazaran lazer kullanılarak yapılan kaynak işlemlerinde katılaşma hızlı gerçekleştiği için tanecik boyutunun daha küçük olduğu gözlenmiştir [74]. Bununla birlikte lazerin malzemeye gereğinden fazla miktarda bir zaman süresinde etki etmesi ısıdan etkilenmiş bölgenin artmasına ve dolayısıyla parçanın sertlik gibi mekanik davranışlarında olumsuz sonuçlara neden olacaktır [75].

Eriyik durumdaki metal bir malzemenin katılaşması ilk olarak çekirdek taneciklerinin oluşması ile başlar ve soğuma ilerledikçe katılaşma devam eder.

Çekirdeklenmenin ilk oluştuğu kısım ise eriyiğin ısısını en çabuk bir şekilde kaybettiği kısımdır [35].

Lazerli yığma işleminde altlık üzerine yığılan eriyiğin ısı kaybı yaşadığı iki tür bölge vardır. Bunlardan birincisi yığının metalik bir malzeme olan altlıkla oluşturduğu ara yüzey, ikincisi ise koruyucu atmosfer gazı ile oluşturduğu ara yüzeydir. Metal malzemelerin ısı iletim katsayıları gazlara nazaran çok daha yüksek olduğu için katılaşma ilk önce altlık ile oluşan ara yüzeyde oluşur.

Yığma malzemesi ile altlık malzemesinin alaşım kompozisyonu aynı olduğu zaman katılaşmanın epitaksiyal tane büyümesi şeklinde olduğu yapılan bazı araştırmalarda gösterilmiştir [76]. Lazerli yığma prosesinde epitaksiyal tane yapılanması, yığın içerisinde oluşan tane yapısının altlığın yeniden eritilerek katılaştığı kısmında oluşan tane yapısı ile aynı oryantasyona sahip olduğu anlamına gelmektedir.

Lazerli yığma prosesi metalürjik bakımdan kısmen lazerli kaynak prosesine benzemektedir. Lazerli kaynak işleminde lazer ışınının eksenine paralel doğrultuda önemli akışlar oluşmaktadır, bu akışlar ise eriyik içerisinde girdaplar oluşturmaktadır. Postacıoğlu ve diğ. bu olayın önemli bir nedeni olarak eriyiğin üst yüzeyinde sıcaklık etkisi ile oluşan yüzey geriliminin değişiminden kaynaklandığını belirtmişlerdir [77].

Lazer kaynağında yaşanan akışların neden olduğu girdaplara ek olarak lazerli yığma işleminde farklı olayların neden olduğu bazı girdaplar da oluşmaktadır. Bu nedenler toz haldeki malzemenin altlıkta oluşturulan eriyik havuzu içerisine basınçlı bir gaz yardımı ile püskürtülmesi neticesinde hem gazın neden olduğu hava akımı ve hem de eriyik içerisine henüz erimeden düşen katı haldeki tozların neden olduğu akış olarak gösterilebilir. Katılaşma esnasında oluşan bu girdaplar yığının geometrisini önemli derecede etkilerler.

Diğer yandan eriyik içerisindeki bu dinamik ortam ve özellikle henüz erimemiş katı durumdaki tozların eriyik ile teması sonucunda eriyik-toz arasındaki ara yüzeyde

gerçekleşen yüksek ısı kaybı da çekirdekleşme ve katılaşmanın farklı yönlerde oluşmasına neden olarak mikro yapıda farklılıklara neden olurlar.

2.3. Lazerli Yığma Sisteminin Çeşitli Olanakları

Eşzamanlı beslemeli lazerli yığma sistemlerinin önceden beslemeli lazerli parça oluşturma sistemlerine göre bir takım üstünlükleri bulunmaktadır. Bu üstünlükleri sağlayan olanaklar şu şekilde sıralanabilir.

Melez parça imalatı:

Lazerli yığma yönteminde parça oluşturmak için beslenen malzeme nozuldan lazerle eş zamanlı olarak beslendiği için farklı bölgelerin farklı malzemelerle oluşturulabilmesi olanağı bulunmaktadır. Bu olanak sayesinde farklı özelliklerde malzemelere sahip tek parçalı modeller üretilebilir. Bu sayede büyük ebatlı ve çok yüksek maliyetli malzemelerin kullanılması gereken durumlarda sadece gerekli olan kısımlar yüksek maliyetli malzemeyle imal edilip, diğer kısımlar daha ucuz maliyetli malzemelerle imal edilebilir.

Buna örnek olarak büyük boyutlu ve derin kaviteli kalıplar gösterilebilir. Kalıp çekirdek kısmı yüksek aşınma direncine sahip malzemelerle, diğer kısımlar ise daha ucuz maliyetli malzemelerle imal edilerek çok önemli miktarlarda kalıp maliyeti düşürülebilir [78]. Diğer yandan, kalıbın soğumasına katkı sağlaması için kalıp çekirdeğine yakın bölgelere bakır malzemeden bir yapı oluşturulması önemli bir avantaj sağlayabilir.

Bu olanaklara ek olarak, işlem esnasında farklı tozların belirli oranlarda proses bölgesine beslenmesi ile istenilen alaşımların yapılabilir olması lazerli yığma ile parça oluşturma metodunun dikkat çekici bir özelliğidir [79, 80].

Parça onarma işlemi:

Lazerli yığma sisteminin yine nozul ile eşzamanlı malzeme besleme özelliği sayesinde yıpranmış ve aşınmış olan yüksek maliyetli ve büyük boyutlu karmaşık yapıya sahip parçaların yeniden kullanılabilmesi için onarma işlemine olanak tanımaktadır. Parçanın onarılacağı kısımlar üç boyutlu koordinat ölçme cihazları (CMM-Coodinate Measuring Machine) ile taranarak 3 boyutlu model haline getirilebilir ve bilgisayar programları vasıtasıyla onarılacak kısımlar belirlenerek bilgisayar kontrollü olarak dolgu işlemi gerçekleştirilebilir. Yığma işlemi lazerle gerçekleştiği için parçanın geri kalan kısmının maruz kaldığı ısı miktarı yerel bölgelerle sınırlı kalmaktadır. Böylece geleneksel parça onarma işlemlerinde yaşanan parçanın mekanik özelliklerinin zarar görmesi problemi söz konusu olmadan onarma işlemi gerçekleştirilebilir [81-83].

Çoklu bileşenli ürün üretimi:

Nozullu yığma metodunun doğasından kaynaklanan bir diğer avantajı ise oluşturulmakta olan parçanın içerisine sensör, mıknatıs gibi başka bir parça konularak (gömülerek) iç içe geçmiş birden çok sayıda bileşenden oluşan parçaların oluşturulabilmesidir [84].

Maskesiz kaplama ile küçük yapı oluşturma:

Çok küçük bir bölgeye yüksek enerji sağlayan lazerli bir sistem olmasından ve nozullu bir yığma metodu olduğundan dolayı farklı özelliklerdeki ve formlardaki altlık malzemeler üzerine maske kullanmadan çok küçük boyutlarda yapı oluşturma olanağı da çok küçük boyutlu parçaların üretilebilmelerine olanak tanımaktadır. Bu olanak sayesinde lazerli yığma metodu mikro elektro-mekanik sistemlerin (MEMS) üretiminde göz önünde bulundurulabilecek bir üretim yöntemidir [8].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR İÇİN DENEY DÜZENEĞİNİN KURULMASI

Lazerli yığma sistemi üzerine çalışma yapabilmek için çalışmanın başlangıcında herhangi bir donanım, teçhizat ve makine imkânı söz konusu değildi. Devlet Planlama Teşkilatı tarafından desteklenen "Yeni bir hızlı prototip sisteminin geliştirilmesi" isimli proje kapsamında son derece sınırlı bir bütçe ile sistem oluşturulmaya çalışılmıştır. Deney düzeneği çok sayıda bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler şu şekildedir.

3.1. Lazer Ünitesi

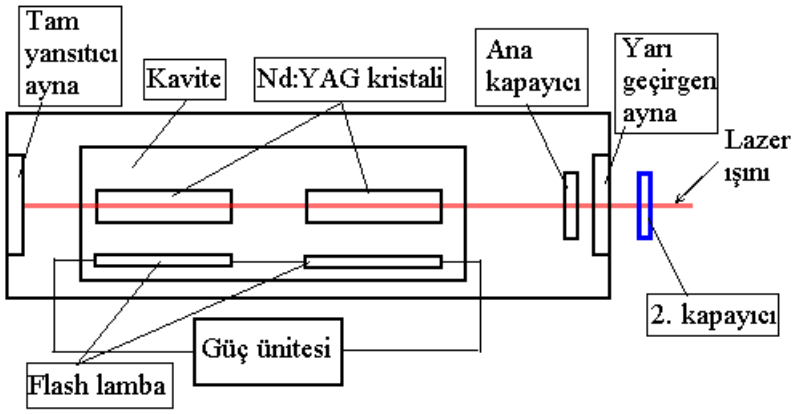
Nd:YAG (Neodymium-doped yttrium aluminum garnet) lazeri, YAG kristalinin flash lamba ile uyarılması ile lazer ışını elde edilmesi prensibine dayanan katı-hal lazeridir. YAG kristali kimyasal olarak çok kararlı bir yapıya ve çok iyi optik özelliklere sahiptir [48, 85]. Nd:YAG lazeri CO_2 lazerine göre metal malzemelerle etkileşimi bakımından yüksek soğurma oranlarına sahiptir. Diğer yandan fiber optik kablo ve mercek gibi optik elemanlarla transfer ve yönlendirme işlemlerinde kullanılabilir olması sonucu imalat işlemlerine uygulama ve adaptasyonunun yapılması da daha kolaydır [86]. Bu nedenlerden dolayı lamba uyarımlı Nd:YAG lazeri kullanılması tercih edilmiştir. Tercih edilen lazer, sürekli dalga tipine ve 1064nm dalga boyuna sahip 250W ortalama gücünde yüksek güçlü lazer ışını üretmektedir. Bu ışının çapı 6.3mm ve rezonatörden çıktıktan sonra 1.5mrad'lık bir açı ile büyüyerek eksenel doğrultuda ışımaktadır.

Lazer ünitesi, elektrik ve elektronik devrelerinden oluşan güç ünitesi ve optik bileşenlerden oluşan rezonatör (lazer kafası) ünitelerinden oluşmaktadır. Güç ünitesinde lazerin oluşturulması için gerekli enerji elde edilerek rezonatör içerisine aktarılır. Bu enerji rezonatör içerisinde bulunan ve birbirleri ile eşeksenli olarak konumlandırılan iki adet YAG kristalinin uyarılması için flash lambaların ışımasında kullanılır. Flash lambaların ışıması sonucunda YAG kristalleri uyarılır ve kristaller

eksenel doğrultuda ışıma oluşturur. Bu ışıma, kristallerin her iki tarafında bulunan aynalar arasında ışımaya devam eder ve ışın belli bir doygunluğa ulaştığında yarı geçirgen aynadan dışarı çıkarak kullanılır duruma gelir [47]. Yüksek güç gerektiren lazer uygulamalarında çoklu kavite kullanımı yaygındır ve kristal sayısı arttıkça lazerin gücü de o oranda artmaktadır [85]. Deney setinde kullanılan lazerin rezonatöründe iki adet kavite bulunmakta ve kristaller birbirleri ile eksenel olarak uç uca gelecek şekilde konumlandırılmışlardır. Lazer rezonatörünün iç kısmının resmi Şekil 3.1'de, şematik gösterimi ise Şekil 3.2'deki deki gibidir.



Şekil 3.1: Nd:YAG Lazeri Rezonatörünün iç kısmının resmi



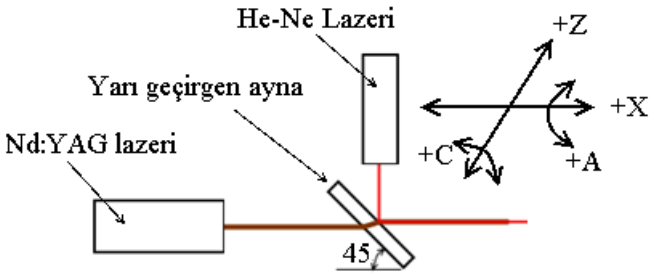
Şekil 3.2: Nd:YAG Lazeri Rezonatörünün Şematik Gösterimi

Lazer ışınının belirli zamanlarda lazer ünitesinden dışarı salınması ve önünün kapatılması için lazer kafası ünitesine 5Hz.'lik bir ana kapayıcı ve ikinci kapayıcı montajı yapılmıştır. Her iki kapayıcı da CNC kontrol ünitesinden otomatik olarak kontrol edilebilir halde montajı gerçekleştirilmiştir. Ana kapayıcı lazerin bir işlemin başlangıcında açılması ve bitiminde kapatılması için düşünülmüş, ikinci kapayıcı ise

işlem aralarında proses bölgesine verilen ışının kısa süreli olarak engellenmesi için düşünülmüştür. Kapayıcı ünitelerin lazer rezonatöründe yerleştirildiği konumlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Lazer ışını kızılötesi (Infra-Red) dalga boyunda yayınım yaptığından gözle görülememektedir. Bu yüzden sistemde odaklama ve bazı ayar işlemlerini gerçekleştirebilmek için kızılötesi ışın üzerine düştüğünde ışının görünür hale gelmesine yarayan bazı malzemeler (Şekil 3.16) ve ek olarak He-Ne (Helyum-Neon) lazeri kullanılmaktadır. Bu lazerin dalga boyu 633nm ve gücü 1.5mW'dır. Lazer kırmızı renkte ışın vermektedir.

Öncelikle yüksek güçlü lazer ile He-Ne lazerinin eksenleri yarı geçirgen ayna kullanılarak çakıştırılır, Şekil 3.3. Daha sonra He-Ne lazeri herhangi bir yüzey üzerine düşürüldüğünde görünür olduğundan dolayı Nd:YAG lazer ışınının odaklandığı konum net olarak görülebilir.



Şekil 3.3: Nd:YAG Lazer ile He-Ne lazer ışınlarının eşeksenli olarak çakıştırılması

Nd:YAG lazerle He-Ne lazerinin eksenlerinin optik olarak çakıştırılması için şu prosedür uygulanmıştır;

✓ Yarı geçirgen ayna (45º'de 1064nm dalga boyu için tam geçirgen, 633nm dalga boyu için tam yansıtan özellikte) Nd:YAG lazerinin ışını tam 45 derece kesecek şekilde sabit bir şekilde konumlandırıldı.

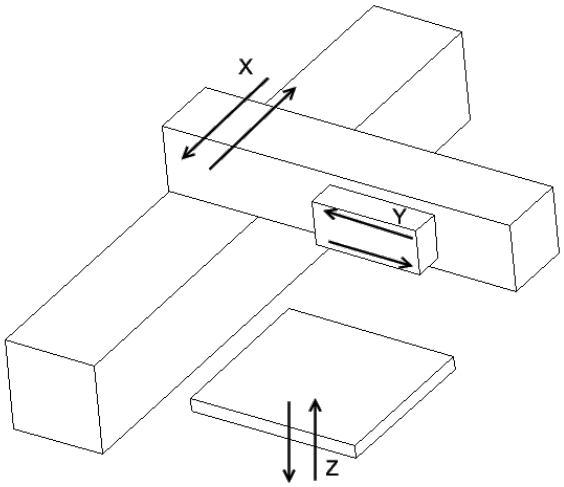
✓ He-Ne lazeri X,Y,A ve C eksenleri olmak üzere 4 eksen hareket kabiliyeti olan bir platform üzerine monte edildi. X ve Z eksenleri, He-Ne lazerini yanal ve dikey yönde

doğrusal olarak hareket ettirmeye, A ve C eksenleri ise sırasıyla yanal eksen (X) etrafında ve dikey eksen (Z) etrafında dönme yönünde hareket ettirmeye olanak tanımaktadır.

✓ Bu hareket kabiliyetleri ile He-Ne lazer ışınının, aynadan geçen Nd:YAG lazer ışını ile çakıştırılması için ayar yapılmasına olanak sağlar.

3.2. CNC Tezgâh

İki yatay eksen ve bir dikey eksende hareket kabiliyeti olan tabla bilgisayar kontrollü olarak servo motorlarla kontrol edilen bir CNC tezgâhına benzemektedir. Ankastre bir tasarıma sahip olan tezgahta yatay eksenlerde hareket kafada gerçekleşirken, dikey eksende hareket proses platformundadır. Yatay eksenlerin hareket miktarları 300mm ve 500mm iken dikey eksenin hareket miktarı 150mmdir. Tabla hareket iletim kısımlarında bilyeli mil ve yatakları kullanılmıştır. Tezgâhın kontrol ünitesi ISO G/M kodlarına uygundur ve her 3 eksende birden hem düzlemsel hem de dairesel hareket gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanı sıra kontrol ünitesi ile lazer rezonatörüne monte edilen her iki kapayıcı ünite de tamamen otomatik bir şekilde kontrol edilebilmektedir. CNC tezgâhın eksenlerinin şematik gösterimi Şekil 3.4'te tezgaha ait bir gerçek bir görüntü ise Şekil 3.5'te görülebilir.



Şekil 3.4: CNC Tezgâhın eksenlerinin hareket yönlerinin şematik gösterimi



Şekil 3.5: CNC Tezgaha ait bir fotoğraf

3.3. Nozul

Nozul, optik elemanların ve CNC tezgahın tablası üzerine sabitlenmesi için gerekli bağlantı deliklerinin de üzerinde bulunduğu üst kısım, toz ve gaz akış (giriş-çıkış) ve kanallarının bulunduğu alt kısım olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Sistemde en önemli bileşenlerden bir tanesi olan nozul birçok işlevi gerçekleştirecek şekilde bölüm imkanları kullanılarak tasarlanıp imal edilmiştir. Bu işlevleri ve özellikleri şu şekilde listelenebilir;

✓ Lazer ışınının proses alanına odaklanabilmesi için gerekli odaklama merceğini üzerinde barındırır.

✓ Lazer ışınının fiber optik kablodan odaklama merceğine geçişini sağlayabilecek şekilde fiber optik kablonun bağlantısının yapıldığı bağlayıcıyı üzerinde barındırır. Ayrıca lazer ışınının nozulun tam merkezinden odaklanabilmesi için bağlayıcının bağlandığı kısımda hassas optik ayar mekanizması bulunur.

✓ Lazer ışınının odaklama merceğinden proses alanına ulaştırılması için yeterli çap ve geometride kanal nozulun merkezinde konumlandırılmıştır.

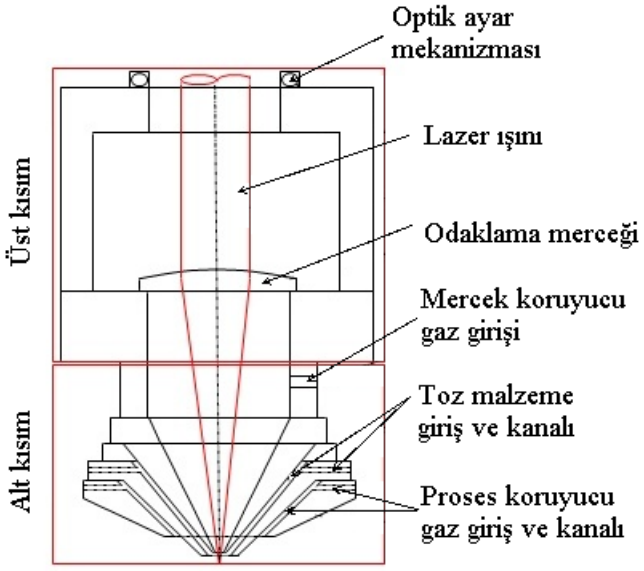
✓ Lazerin odaklandığı bölgeye toz malzemenin beslenmesini sağlayan toz besleyici üniteden gelen ve 4 kola ayrılan hortumların bağlandığı girişler bulunur. 4 farklı noktadan nozula giren tozların proses bölgesine homojen bir şekilde beslenmesini gerçekleştirmek maksadıyla bütün girişler 360 derece kesintisiz ve belli bir açıdaki kanala açılır. Böylece toz besleyici üniteden çıkan belli bir debideki toz 4 kola ayrılırken yaşanması muhtemel düzensiz paylaşım bertaraf edilmiş olmakta, proses bölgesine nozulun ucundan çıkan toz aynı noktaya doğru beslenmektedir.

✓ Proses esnasında eriyik durumdaki metali oksidasyondan korumak için koruyucu gazın proses bölgesine beslenmesini sağlayan gaz giriş ve akış kanalı bulunmaktadır.

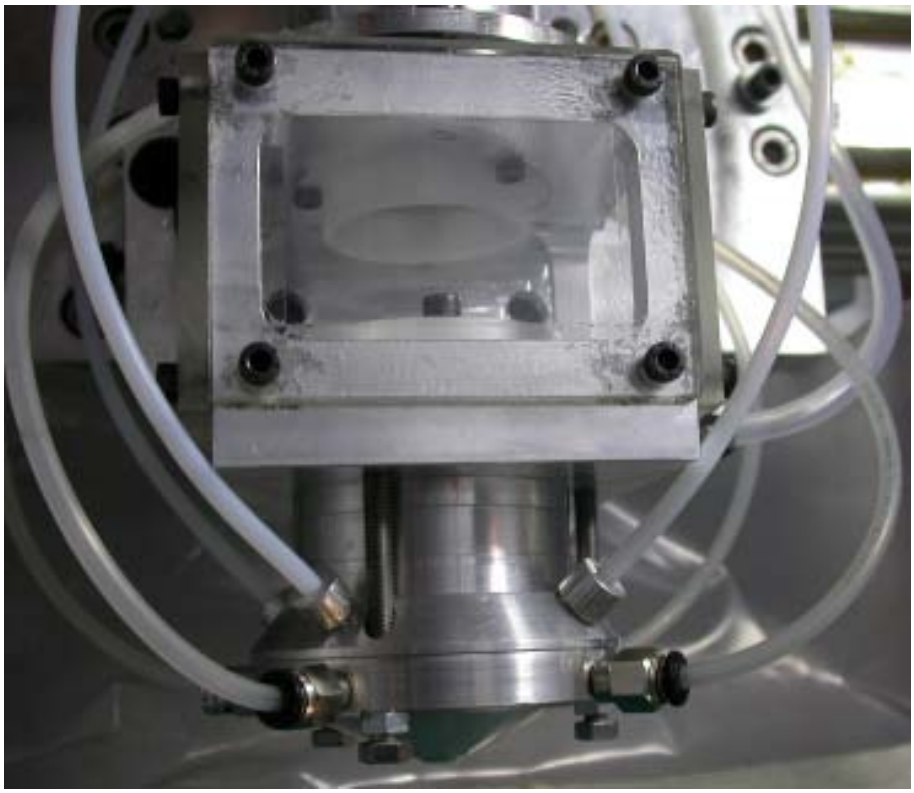
✓ Yine proses esnasında saçılan duman ve tozun merceğe zarar vermemesi için merceğin alt kısmında bir hava yastığı ve yüksek basınç ortamı oluşturacak şekilde gaz giriş ve kanalı bulunmaktadır.

Nozulun teknik resim tel kafes önden görünüşü Şekil 3.6'da, gerçek bir fotoğrafı ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Katı model kesit görüntüsü ve nozulu oluşturan parçaların ayrı ayrı ve montaj edilmiş şekilde diğer görüntüleri Ekler'de verilmiştir.

Nozul CNC tezgah üzerine yatay eksenlerin hareketli olduğu kısma monte edilmiştir. Diğer bir deyişle nozul yatay eksende her iki yönde (X ve Y) hareket kabiliyetine sahiptir. Nozulun proses alanına yaklaşıp uzaklaşmasını sağlayan düşey hareket ise proses platformunun konumlandırıldığı Z ekseni ile gerçekleştirilmekte, nozul düşey yönde hareket etmemektedir.



Şekil 3.6: Nozulun şematik gösterimi



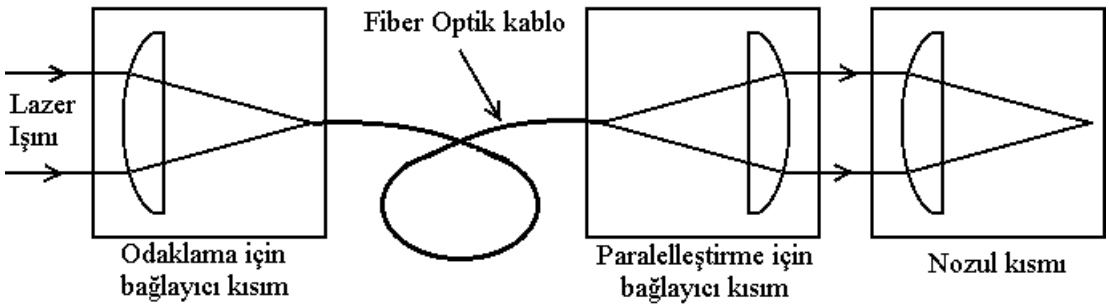
Şekil 3.7: Nozulun montaj yapılmış bir fotoğrafı

Nozul özgün tasarıma sahip olup, tasarımı bölümümüz bünyesinde kullanımda olan ProEngineer Wildfire CAD/CAM programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nozulun sıralanan görevleri gerçekleştirebileceği şekilde olması, yapısının karmaşık bir

tasarıma sahip olmasına neden olmuştur. Nozulu oluşturan parçaların tamamı imalat atölyesinde bulunan torna ve 5 eksenli hareket kabiliyeti olan Deckel Maho markalı CNC işleme merkezi ile gerçekleştirilmiştir. Nozul son haline gelinceye kadar farklı tasarımlar gerçekleştirilmiş ve farklı yapılarda nozullar imal edilmiştir. Eski tasarımlara sahip bazı nozul resimleri Ekler'de görülebilir. Edinilen tecrübe sonucu en son imal edilen nozul istenilen ihtiyacı karşılamakta ve kullanılmaktadır.

3.4. Optik Ünitesi ve Mekanik Aksamı

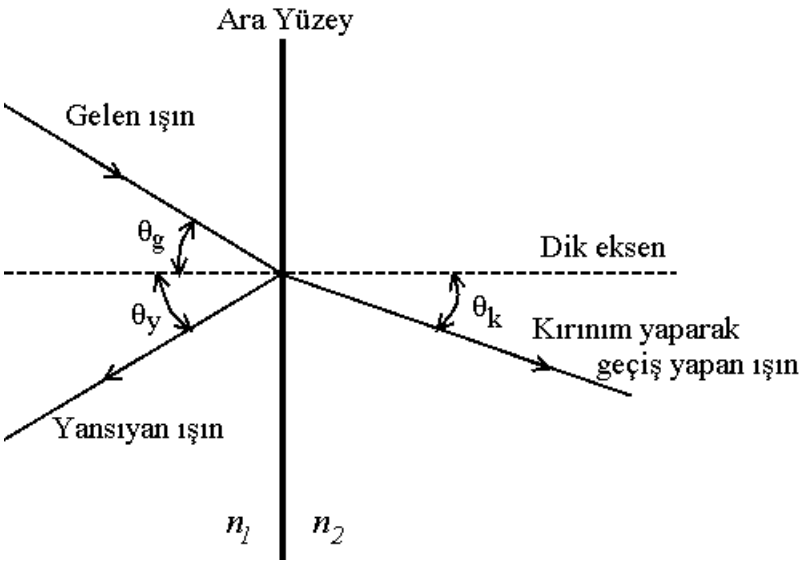
Lazer ışınının proses bölgesine taşınması ve sonrasında odaklama işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için mercekler ve fiber optik kablo gibi optik elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3.8'de şematik olarak gösterilen optik düzende görüldüğü gibi fiber optik kablonun ve merceklerin gerekli pozisyonlarda kullanılabilmesi için bazı optik-mekanik mekanizma ve aparatlar kullanılmıştır.



Şekil 3.8: Optik eleman düzeninin şematik gösterimi

3.4.1. Optiklerle ilgili bazı teorik bilgiler

Bir ışık huzmesi bir ortamdan başka bir ortama geçerken iki ortamın kesiştiği yerde oluşan arayüzeyde ışığın bir kısmı yansıma yapar. Yaşanan bu yansımanın miktarını etkileyen en önemli unsurlar ışığın arayüzeye olan açısı ve arayüzeyi oluşturan her iki ortamın kırılma indisleridir [87,88]. Bu olay Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Kırınım-Yansıma Diyagramı (Fresnel Yansıması) [87]

Şekilde ara yüzeye θ_g açısı ile gelen ışın ara yüzeye temas etmesi sonucunda ışığın bir kısmı θ_k açısı ile kırınım yaparak ikinci ortama geçiş yapacak, geri kalan kısmı ise θ_y açısı ile geri yansıma yapacaktır [29, 86-88].

Gelen ışık ile kırınım yaparak diğer ortama geçen ışığın ara yüzeyin dik eksenine göre yaptığı açılar (sırasıyla θ_g ve θ_k) arasındaki ilişkiyi Snell kanunu belirler [87,88];

$$n_1 \sin\theta_g = n_2 \sin\theta_k \tag{3.1}$$

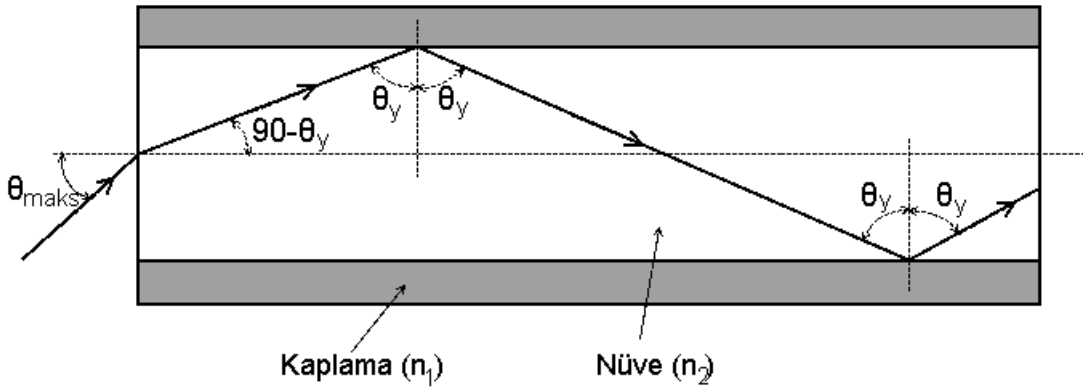
Işığın ara yüzey üzerine dik pozisyonda geldiği durumlarda (yani $\theta_g \approx \theta_y \approx 0$ durumunda) yansıma şiddetini belirleyen en önemli unsur ara-yüzeyi oluşturan ortamların kırılma indisleridir. Bu durumda geri yansıma şiddeti yansıma katsayısı (R) ile şu şekilde tanımlanabilir [88,89];

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \tag{3.2}$$

Yansıma katsayısı 0 ile 1 değeri arasında bir değer alır ve genellikle yüzde (%) olarak gösterilir. Yansıma katsayısını tamamlayıcı değer olan geçirgenlik katsayısı

ise T ile gösterilir. Soğurmanın (absorbtion) ve saçılmanın (scatter) ihmal edildiği durumlarda T=1-R eşitliği geçerlidir.

Bir lazer ışınının fiber optik kablo ile taşınmasının gerçekleştirilebilmesi için lazer ışınının fiber optik kablo içerisine odaklanması gerekmektedir. Bir mercek yardımı ile lazer ışını bir koni oluşturarak fiber optik kablonun ön yüzüne odaklanır. Fiber optik kablonun ön yüzeyine odaklanan koni şeklindeki lazer ışınının geliş açısı (koninin dik eksenle yaptığı açı) belli bir değeri aşmamalıdır. Şekil 3.10'da fiber optik kablonun kabul edebildiği maksimum açı θ_{maks} olarak gösterilmiştir [88].



Şekil 3.10: Fiber optik kabloda yaşanan optik transfer [88]

Bu açı fiber optik kabloyu oluşturan nüve ve kaplama malzemelerinin kırılma indisleri ile ilişkilidir. Kısa mesafe enerji taşımakta kullanılan fiber optiklerde taşınacak ışının sahip olabileceği maksimum odaklama açısını (θ_{maks}) tanımlayan terim NA (Numerical aperture) olarak adlandırılır ve odaklama açısı ve fiber optik malzemenin kırılma indisleri ile ilişkisi Denklem (3.3)'te gösterilmiştir [87, 88].

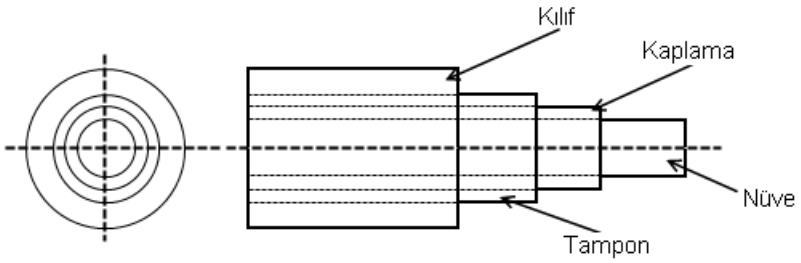
$$NA = n\ sin\,\theta_{maks} = \sqrt{{n_1}^2 - {n_2}^2} \tag{3.3}$$

Denklemde n_1 ve n_2 sırasıyla fiber optik kabloyu oluşturan nüve ve kaplama malzemelerinin kırılma indisleri, n ise fiber optik kabloya girişte ışının bulunduğu ortamın kırılma indisidir.

Deney setindeki optik sistemi oluşturan odaklama ve paralelleştirme işlevi gören bütün mercekler ve fiber optik kablonun nüve malzemesi silistir (fused-silica). Lazerin dalga boyu 1064nm olduğuna göre silisin bu dalga boyundaki kırılma indisi 1.45'dir [90].

3.4.2. Fiber optik kablo ve taşıyıcı mekanik aksamı

Yüksek güçlü lazer uygulamaları için uygun olarak seçilmiş olan fiber optik kablosunun nüve malzemesi silistir ve 550µm çapındadır. Bu nüveyi kaplayan (saran) ve yansıtıcı görevi gören malzeme florlu silistir ve 25µm et kalınlığındadır. Bu kaplamanın dışında 15µm et kalınlığında olan ve sert bir polimer olan tampon malzemesi vardır ve en dış kısımda ise fiber optik malzemeyi dış etkenlere karşı koruyucu vazifesi gören ve fiber optik kabloya esneklik kazandıran dış çapı 1040µm (et kalınlığı=205µm) olan kılıf bulunmaktadır. Fiber optik kablo NA=0,22 özelliğindedir [91] ve Denklem (3.3)'e göre maksimum kabul edebileceği lazer ışın koni açısı (θ_{maks})12.7º dir. Kullanılan fiber optik kablonun yapısı Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

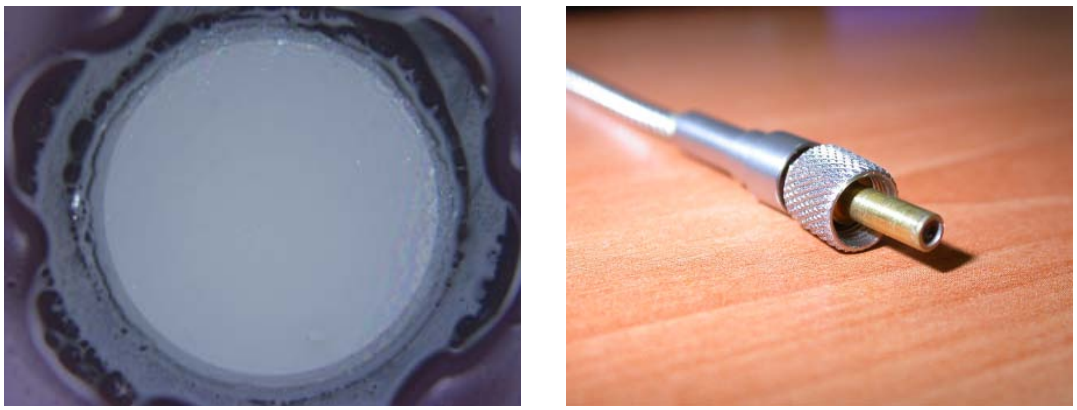


Şekil 3.11: Fiber optik kabloya ait şematik bir görüntü [91]

Fiber optik kablosunun optik bir düzenekte bağlantılarının yapılabilmesi için toplam 3m uzunluğunda olan kablonun her iki ucuna da yüksek güçlü enerjiye dayanım gösterebilme özelliği olan SMA905 bağlayıcısı montajlı bir şekilde sipariş edilmiştir. Kanadadan alınan bu fiber optik kablonun belirli bir süre kullanıldıktan sonra soğutma ünitesinin olmamasından ve küresel mercek kullanılmasından dolayı uç kısmı yanmıştır. Bunun üzerine fiber bağlayıcısına benzer yapıda bağlayıcı tasarlanıp imal edilmiş, yüksek sıcaklığa dayanım gösteren bir yapıştırıcı ile fiber kablo bağlayıcıya tutturulmuştur.

Son yıllarda özellikle telekomünikasyon sektöründe kullanılan fiber kabloların nüve çapları 3-5µm civarındadır. Bu çaptaki fiber optik kabloların montajının yapılması için uç kısımlarının belirli bir şekilde kesilmesi işlemi yeterlidir, bu yüzden bu fiberlerin onarım ve montajında problem yaşanmaz. Fakat yüksek güçlü enerji transferinde kullanılan fiber kabloların nüve çapı büyük olduğu için (550µm) kesme işlemi yeterli olmamakta, yüzey büyük olduğu için kesilen yüzey pürüzlü veya eğri olmaktadır. Pürüzlü veya eğri yüzey ise gelen ışınların çoklu yansıma veya yetersiz yansıma yapmasına neden olmakta bu da hem fiberin kısa sürede tekrar bozulmasına hem de kaybın çok yüksek olmasına neden olmaktadır.

Bu pürüzlülüğü gidermek için kesilen yüzeylerin ince bir zımpara ile zımpara ve parlatma işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sırasıyla 3µm, 1µm ve son olarak da 0.3µm'lik zımpara kağıdı ile fiberin her iki ucu parlatılmıştır. Bu parlatma işleminin hassas yapılabilmesi için fiber uç kısmında olması gereken ve geri yansımayı engelleyen belli bir miktarda açı verecek şekilde tornada parlatma tutucusu yapılmış ve tutucu ile birlikte saf su kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatılan fiber optik kablonun mikroskop görüntüsü ve bağlayıcıya monte edilmiş halindeki görüntü Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Parlatılmış fiber optik kablonun uç görüntüsü (500:1 büyütme) ve bağlayıcısı

Lazer rezonatöründen çıkan ve 6.3mm çapında olan yüksek güçlü lazer ışınının 550µm çapında olan fiber optik kablonun nüve kısmından transfer edilebilmesi için fiber optik kablonun giriş kısmında nüve çapından daha düşük çapta olacak şekilde odaklanması gerekmektedir.

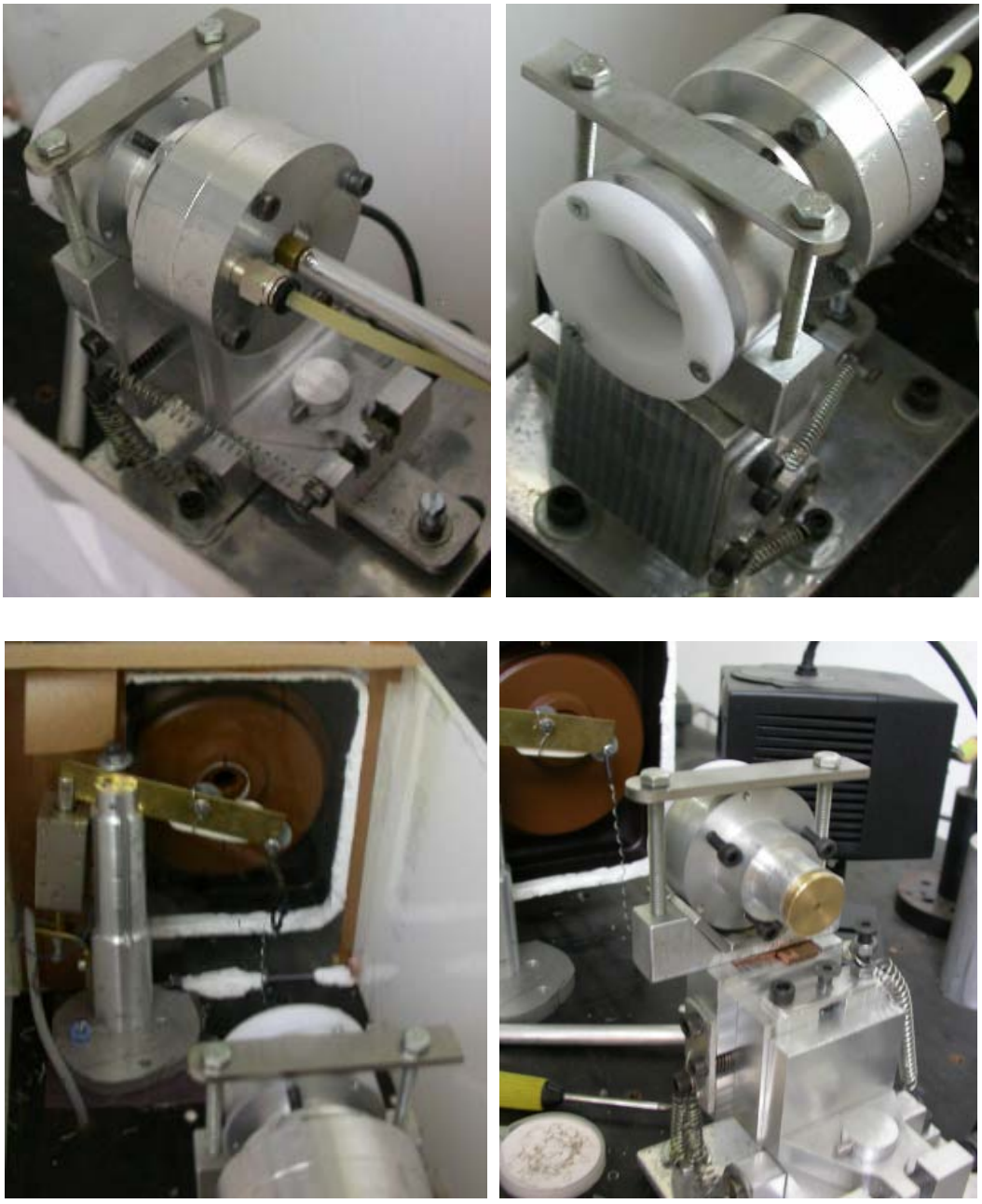
Bunun için içerisinde odaklama merceği bulunan bir lazer-fiber bağlayıcısı kullanılmıştır, Şekil 3.8. Kullanılan odaklama merceği 40mm odak uzaklığına ve 40mm silindirik çapa sahip, küresel olmayan (asiferik) düz-dışbükey (plano-convex) bir mercektir. Yani merceğin bir tarafı düzlemsel bir yüzey iken diğer tarafı dışbükey yapıdadır. Küresel olmayan mercek türünün kullanılmasının nedeni aynı özellikteki küresel merceklere göre küresellik hatasının minimumda olmasından dolayıdır. İlk denemelerde küresel mercek kullanılmıştı, fakat odaklanan lazer ışınının küresel hatadan dolayı fiber optik kablonun nüve kısmını aşarak kaplamasına zarar vermesinden dolayı ilerleyen zamanlarda fiber optikte bozulmalar yaşanmıştır.

Bu tür problemleri gidermek için küresel olmayan mercek kullanımının yanı sıra lazer-fiber bağlayıcısı da yeniden tasarlanmış ve yeni tasarım su soğutmalı hale gelmiştir.

Diğer yandan optik sistemin mekanik montajından ve lazerin kararsız çalışması sonucu fiber optik kablo üzerine fazla enerji yayınımı yapması gibi çeşitli muhtemel problemler nedeniyle fiber kaplamasına zarar vereceği düşünülen lazer ışınının, gelen açıya göre sadece nüvenin iç kısmına odaklanacak miktardaki lazer ışınının geçebileceği bir yüzük tasarlanmıştır.

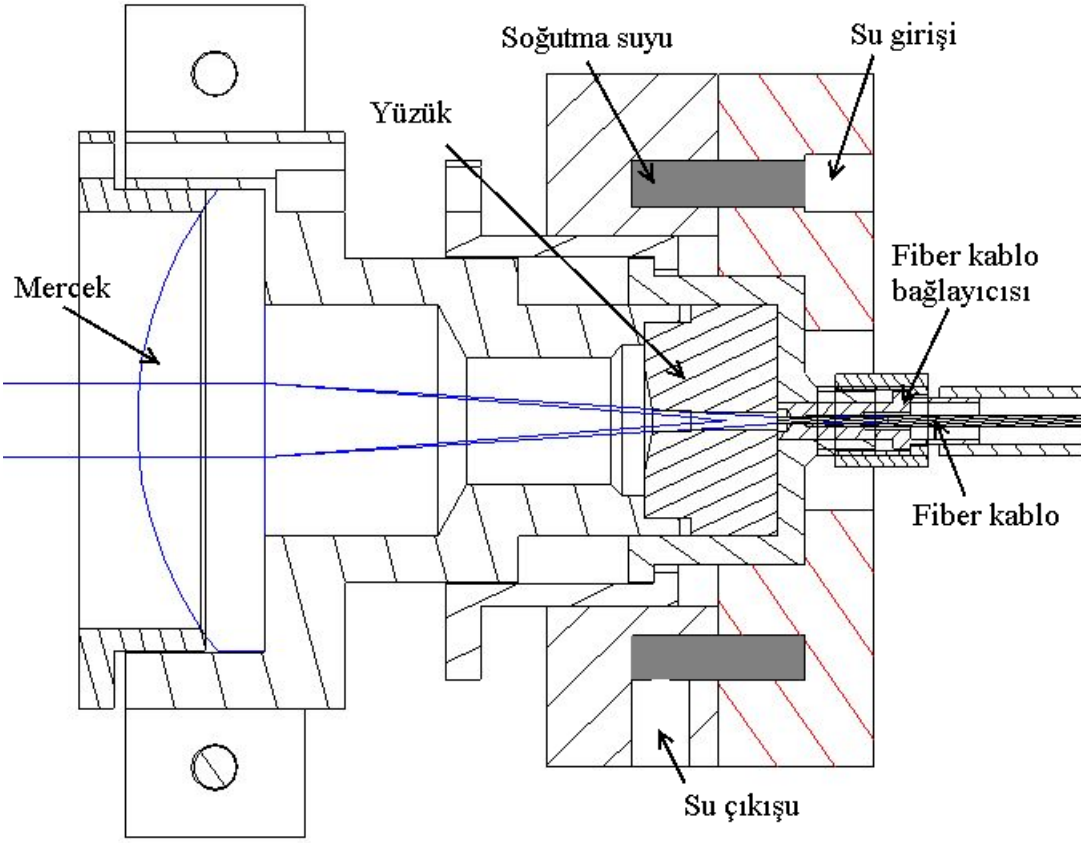
Belirtilen unsurları üzerinde barındıran ve imalatı yapılarak montajı gerçekleştirilen lazer-fiber bağlayıcısının konumlandırıcı platform üzerine montaj edilmesi esnasında ve montaj edilerek lazer ışınının ekseni ile çakıştırılmış haliyle çekilen bazı fotoğrafları Şekil 3.13'te, teknik resmi ise Şekil 3.14'te gösterilmektedir.

Lazer-fiber bağlayıcısının lazer ekseni ile çakıştırılabilmesi için He-Ne lazerinin konumlandırılmasında kullanılan platforma benzeyen 4 eksen hareket kabiliyeti olan bir platform tasarlanıp, imal edilerek montajı yapılmıştır. Doğrusal eksenler optik fiberin uç kısmını lazer ışınının hizasına taşımak için, dönel eksenler ise optik fiberin ekseni ile lazerin ekseninin çakıştırılarak hem kaybın minimum olmasını sağlamak ve hem de fiber çıkışında lazer ışınının düzgün bir şekilde çıkmasını sağlamak için gereklidir.

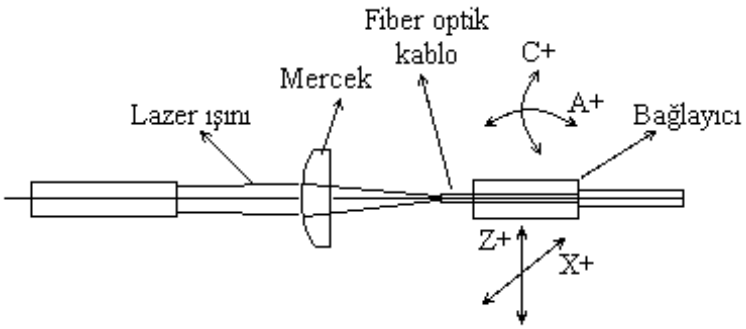


Şekil 3.13: Lazer-Fiber bağlayıcısına ait fotoğraflar

Lazer-fiber bağlayıcısının üzerinde konumlandırıldığı platformun ayarlama eksenlerinin gösterildiği şematik görüntü Şekil 3.15'te, fotoğraflar ise Şekil 3.13'te montaj edilmiş hali ile görülebilir.



Şekil 3.14: Lazer-Fiber bağlayıcısı teknik resmi



Şekil 3.15: 4 eksen hareket kabiliyetine sahip bağlayıcı konumlandırıcı platformun şematik görüntüsü

1064nm dalga boyunda ışınım yapan Nd:YAG lazer ışını görünmez olduğu için ayar yapılması esnasında bazen ışının görüntülenmesi gerekmektedir. İçerisinde fosfor bulunan bir malzeme üzerine lazer ışını yansıtıldığında malzeme içerisindeki fosforun kızılötesi ışınım tarafından uyarılması sonucu görünür ve parlak bir ışık vermesi ile lazer ışını görüntülenebilir.

Montajı yapılan fiber optik kablonun lazer ışını ile çakıştırılması için yapılan ayarlama esnasında fiber optik kablonun diğer ucundan çıkan lazer ışınının profilinin gözlenmesi için içerisinde fosfor bulunan seramik bir malzeme üzerine düşürülerek görünür hale getirilmesinin bir fotoğrafı Şekil 3.16'da görülebilir.



Şekil 3.16: Fiber optik kablo ayarlama esnasında görünür hale getirilen lazer ışını

3.4.3. Mercekler ve taşıyıcı ayarlı mekanik aksamı

Sistemde kullanılan tüm mercekler silis malzemesinden isteğe özel olarak Adapazarı 1.Ana tamir bakım merkez komutanlığı Optik Laboratuarında yaptırılmıştır. Şekil 3.8'de de görüldüğü gibi sistemde 3 adet mercek kullanılmıştır.

İlk mercek lazer ışınının fiber optik kablonun uç kısmından giriş yapabilmesi için odaklanması amacıyla kullanılan mercektir. Bu mercek daha önce belirtildiği gibi küresel olmayan ve düz-dışbükey bir mercektir.

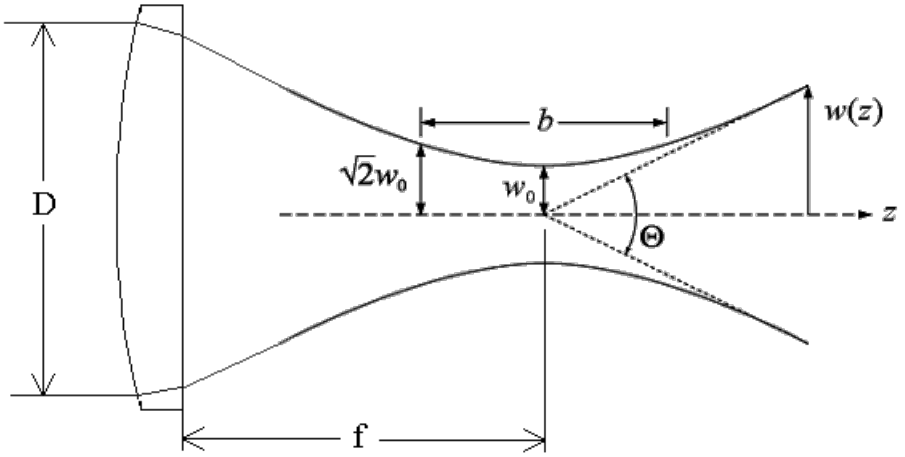
Fiber optik kabloya odaklanarak giren lazer ışını fiber optiğin diğer tarafından çıkarken de yaklaşık olarak girdiği açıya yakın bir açıda dışa doğru açılarak çıkar. Lazer ışınının proses bölgesine odaklanmasından önce ışının paralelleştirilmesi gerekmektedir. Paralelleştirme işleminin gerçekleştirilmesini sağlayan mercek sistemdeki ikinci mercektir ve bu mercek küresel bir mercektir. İmalat maliyeti bakımından küresel mercekler daha ucuz olduğu için paralelleştirme aşamasında küresel olmayan mercek kullanımına gerek duyulmamıştır. Küresel merceğin dik eksenini fiber optik kablonun ekseni ile çakıştırılabilmesi için fiber-nozul bağlayıcısı tasarlanıp imal edilmiştir. İnce optik ayarının yapılabilmesi için 3 ayak prensibine

benzer bir ayar mekanizması yapılmıştır. Paralelleştirme merceği 120mm odak uzaklığına ve 40mm silindirik çapa sahip olan silindirik düz-dışbükey bir mercektir. Paralelleştirme merceği fiber optik kablonun ucundan odak uzaklığı mesafesinde konumlandırılmıştır. Kullanılan merceğin odak uzaklığı arttıkça paralelleştirilen lazer ışınının çapı büyüyecek, azaldıkça da ışın çapı azalacaktır. Kullanılan merceğin özelliğine göre ışın çapı yaklaşık olarak 20mm olmaktadır.

Bağlayıcıdan paralelleştirilerek çıkan lazer ışını nozul içerisinde bir başka mercek kullanılarak proses bölgesine odaklanır. Bu mercek de düz-dışbükey yapıda ve küresel olmayan bir mercektir. Odak uzaklığı70mm ve silindirik çapı 40mmdir. Yine bu merceğin de küresel olmayan bir mercek olarak seçilmesi yapılan bazı denemeler sonucunda karar verilmiştir. Küresel mercekte odaklama hatası çok olduğu için aynı özelliklerdeki küresel olmayan merceğe oranla spot çapını küçültmek sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bundan dolayı sonraki kullanımlarda küresel olmayan merceğin kullanımına geçilmiştir.

Merceklerin konumlandırılması ve bağlantılarında kullanılan tüm bağlayıcılar özgün tasarıma sahiptir ve bölüm laboratuarı kullanılarak imal edilmişlerdir. Bağlayıcılara ait fotoğraf ve teknik resim görüntüleri Ekler'de görülebilir.

Mercekle odaklanan lazer ışınının çapı, başta lazer ışınının dalga boyu olmak üzere odak uzaklığı ve odak yarıçapı gibi bazı parametrelerle ilişkili olarak küçülerek odak mesafesinde minimum boyuta ulaşır, sonra tekrar büyümeye başlar. Işın spotunun küçülüp daha sonra büyümeye başladığı bölgeye bel (waist) kısmı adı verilir ve bu bel kısmının en ince yeri en küçük spot büyüklüğü olarak kabul edilir, Şekil 3.17 [92]. Şekilde w_0, en küçük spot yarıçapı ve b ise odak yüksekliği olarak adlandırılır. Tıpkı spot büyüklüğünde olduğu gibi odaklama merceğinin özelliği odak yüksekliğini de belirleyen önemli bir etmendir.



Şekil 3.17: Odaklanan ışının bel kısmı

Yüksek güçlü lazer proses işlemlerinde odaklanan lazer ışınının çapı, ışının maksimum yoğunluğunun $1/e^2$ (%13.5) seviyesine karşılık gelen değer olduğu kabul edilir [47]. Lazer ışınının yoğunluğunun %86.5'i (100-13.5) odaklanmış ışının çapı olarak kabul edildiğinde spot çapı "*W*";

$$W = 2W_0 = \frac{2f\lambda}{D} \tag{3.4}$$

şeklinde, odak yüksekliği "*b*" ise;

$$b \approx 2\pi\lambda.(\frac{f}{D})^2 \tag{3.5}$$

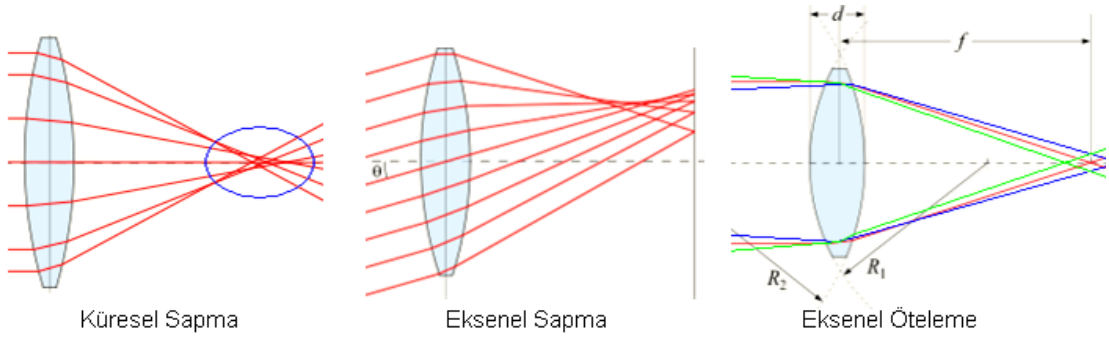
şeklinde tanımlanabilir. Bu eşitliklerden spot çapı ile odak yüksekliği arasında;

$$\frac{b}{W} = \frac{2\pi\lambda(f/D)^2}{2\lambda f/D} = \pi f/D \tag{3.6}$$

şeklinde bir orantı olduğu ortaya çıkar. Görüldüğü gibi burada belirleyici etken kullanılan merceğin özelliği ve merceğe gelen ışının çapıdır.

Teorik olarak lazer spot büyüklüğü ve odak yüksekliğinin miktarı hesaplanabilmesine rağmen pratikte kullanılan ve montaja dahil edilen optik elemanların eksenleri ve konumlarının tam olarak çakışık ve düzgün yerleştirilmiş

olması mümkün olmadığından ve ortaya çıkacak diğer hatalardan dolayı lazerin ışın çapının en küçük olduğu ölçü ve buna bağlı olarak odak yüksekliği de teorik ölçüden büyük olacak, odak uzaklığı da teorik odak uzaklığından daha yakın veya daha uzak olabilecektir. Bu problemlerin neden olacağı hata şekilleri Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18: Odaklama hata şekilleri

Lazer ışın yoğunluğunun proses üzerine etkisinin çok fazla olmasından dolayı odak uzaklığının ve odak çapının tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bunun için bıçak kenarı (knife-edge) metodu kullanılmıştır. Bu metot yardımı ile bel bölgesinin geometrisi çıkarılmakta ve minimum spot büyüklüğü ve odak uzaklığı tam olarak ölçülebilmektedir.

3.4.4. Lazer ışınının odak bölgesinin (bel geometrisi) gerçek profilinin oluşturulması

Düşük güçlere sahip lazerlerde güç farklılıkları odak uzaklığında ve spot büyüklüğünde değişim göstermez. Fakat yüksek güçlü lazer ışını lazer rezonatöründen çıktıktan sonra fiber optik kablo ve mercek gibi optik malzemeler yardımı ile proses bölgesine taşındığından dolayı kullanılan bu optik malzemelerin açığa çıkan yüksek ısı karşısında göstermiş olduğu davranış farklılıkları spot büyüklüğünün ve odak uzaklığının farklı olmasına neden olabilmektedir. Optiklerin ısıl genleşmesinden dolayı yüzeylerde oluşan gerilmeler farklı bir mercek etkisi oluşturmakta bu da gerek spotun çapının değişmesine ve odak uzaklığının farklılık

göstermesine gerekse spotun konumunda değişikliklere yol açabilmektedir. Bunun gibi davranış değişiklikleri optiklerin lineer olmayan problemleri arasındadır.

Söz konusu edilen bu tür problemlerin yanı sıra deney setinde bulunan bütün ekipmanlar (fiber optik kablonun konnektörüne bağlanıp yüzeyinin polisaj işlemi dahil) laboratuar imkanları ile oluşturulduğundan onlarca kez test edilip kullanılan ticari ekipmanlar gibi performans vermemekte, bundan dolayı optik ve mekanik eksenlerin tam çakıştırılamamış olmasından kaynaklanan problemler de göz önünde bulundurulması gereken bir konudur.

Bu yüzden yüksek güçlü lazerle çalışabilmek için çalışma gücü belirlendikten sonra o güçte lazerin spot büyüklüğünün ne kadar olduğunun ve oluşan spotun odak uzaklığının bulunması gerekmektedir.

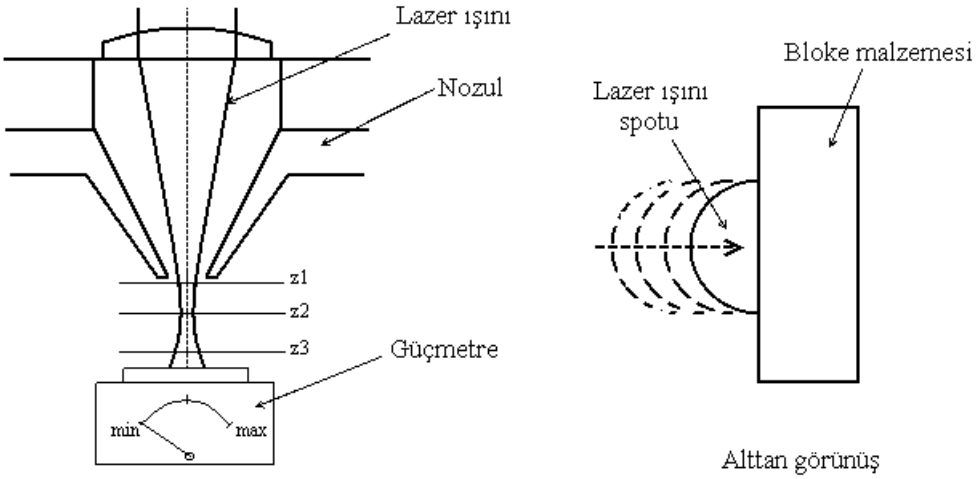
Bunu gerçekleştirmek için bıçak kenarı (knife-edge) olarak adlandırılan bir yöntemden yararlanılmıştır. Bu yöntem lazer ışınının enerjisinin lazer ışın eksenine dik bir yönde bir bloke malzemesi kullanılarak belirli aralıklarla kesintiye uğratılması ve bloke olmayan lazer ışın enerjisinin de bir dedektör üzerine düşürülmesi ile gücünün ölçülmesi prensibine dayanmaktadır.

Deneylerde kullanılan lazer gücünün yüksek olmasından dolayı bu güçteki bir enerjiye dayanım gösterecek bloke malzemesi bulmakta sıkıntı yaşanmıştır. Metal malzemelerin dayanım gösteremeden erime yaşadığı bu ölçümde en iyi verim alümina malzemeden alınmıştır. Bu malzeme lazerin yüksek enerjisine dayanım göstermiş ve özelliğini uzun süre koruyarak bloke özelliğini başarılı bir şekilde korumuştur.

Lazerin teorik odak mesafesinde lazer ışınını tam kapatacak şekilde konumlandırılan bloke malzemesi tam açık duruma gelinceye kadar sabit aralıklarla lazer eksenine dik yönde hareket ettirilir. Her ilerleme sonrası güç-metreden lazerin gücü ölçülür, Şekil 3.19.

Optik-mekanik problemlerden kaynaklanan muhtemel problemleri de göz önünde bulundurarak gerçek minimum odak büyüklüğü ve gerçek odak uzaklığının tam olarak tayin edilebilmesi için teorik odak uzaklığı bölgesinde 3 farklı konumda (Z_1,Z_2,Z_3) ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Geometrik problemlerden dolayı sadece tek yönde ölçüm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Buna göre Z_1 mesafesi teorik odak uzaklığından bir miktar içeride bir seviye olarak kabul edilmiş ve diğer ölçümler 1mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Z_1 seviyesi nozulun uç kısmından 0,1mm mesafededir. Ölçüm tekniği temsili olarak Şekil 3.19'da, sonuçlar ise Tablo 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.19: Bıçak kenarı metodu için yapılan ölçümlerin şekli

Tablo 3.1: Bıçak kenarı metodu için yapılan ölçüm sonuçları

Z_1		Z_2		Z_3	
Mesafe (mm)	Güç (W)	Mesafe (mm)	Güç (W)	Mesafe (mm)	Güç (W)
0	73,7	0	73,7	0	73,7
0,15	53,8	0,1	66	0,2	66,6
0,25	27,5	0,25	24,9	0,35	36,5
0,4	6,4	0,35	6,4	0,55	6,4

Her mesafe için yapılan ölçüm sonucunda elde edilen sonuçlar kullanılarak Denklem (2.7)'de belirtilen gauss profili hedeflenerek regresyon analizi yapılır

Her mesafe için ayrı ayrı olmak üzere Mathematica programı kullanılarak elde edilen modeller şu şekildedir.

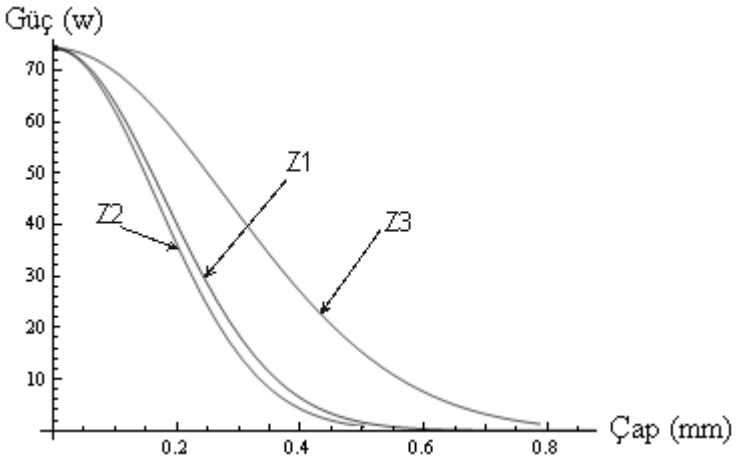
$$I_{Z_1} = 74{,}2654e^{-15{,}3886{D_1}^2} \tag{3.7}$$

$$I_{Z_2} = 75{,}7876e^{-17{,}9604{D_2}^2} \tag{3.8}$$

$$I_{Z_3} = 77{,}9749e^{-6{,}3397{D_3}^2} \tag{3.9}$$

Elde edilen modellere ait gauss profil eğrileri Şekil 3.20'de görülmektedir.

Odak bölgesinde oluşan bel geometrisinin oluşturulabilmesi için öncelikle ölçülen lazer gücünün maksimum değerinin $1/e^2$ (=%13,5) seviyesinde oluşan çap değerinin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bunun için de elde edilen modellerin kökleri bulunarak $1/e^2$ seviyesinde çap ölçüleri bulunmuştur. Sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir.

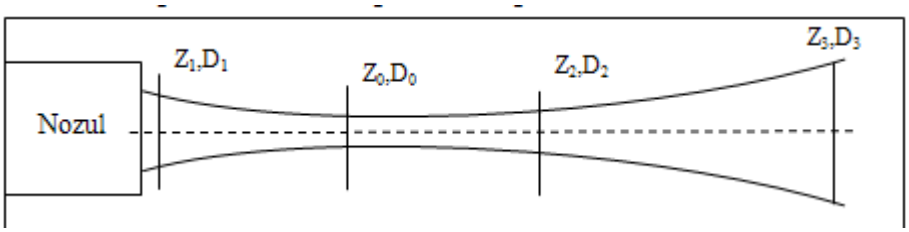


Şekil 3.20: Ölçüm sonuçları

Tablo 3.2: Her seviyede hesaplanan çap ölçüleri

Seviye	Işın çapı (mm)
Z_1	0,362
Z_2	0,336
Z_3	0,569

Sonuçlardan anlaşıldığına göre gerçek odak uzaklığı Z_1 ve Z_2 seviyeleri arasında bir yerde olacağı anlaşılmaktadır, Şekil 3.21.



Şekil 3.21: Gerçek odak uzaklığının (Z_0) konumu

D_0 ile gösterilen minimum ışın çapının ve Z_0 ile gösterilen odak uzaklığının bulunması için gerekli olan veriler şu an için tamamlanmıştır. Bu verileri derleyebilmek için Denklem(3.10) kullanılır [93].

$$D_n^2 = D_0^2 + (\frac{4M^2\lambda}{\pi})^2 \frac{(Z_n - Z_0)^2}{D_0^2} .....n = 1,2,3 \quad (3.10)$$

Denklemde; D_n, lazer spotunun Z_n mesafesindeki çapını, D_0 minimum spot çapını, Z_0 minimum spot çapının oluştuğu odak uzaklığını, λ lazerin dalga boyunu, M^2 ise lazer ışın kalite parametresini temsil etmektedir.

Ölçülen ve bilinen değerler denklemde yerine konulduğunda yüksek dereceli üç bilinmeyenli (M^2, Z_0 ve D_0) üç non-lineer denklem oluşur. Bu denklemler Mathematica 6.0 programı kullanılarak çözülmüştür.

Denklemler çözüldüğünde elde edilen sonuca göre lazer ışınının odaklandığı bel bölgesinde minimum spot çapının D_0=0.304mm olduğu ve bu çapın oluştuğu odak uzaklığı ise nozul uç kısmından itibaren Z_0=0.679mm olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Diğer yandan oluşan bel kısmında lazer ışınının etkili olduğu kabul edilen yükseklik odak yüksekliği (*b*) olarak tanımlanır ve şu şekilde bulunur.

$$\frac{b}{2} = \pm 0.08\pi \frac{D_0^2}{M^2\lambda} \quad (3.11)$$

Buna göre odak yüksekliği 0.574mm olarak çıkmaktadır.

Denklem (3.10) kullanılarak odak yüksekliği sınırlarını oluşturan ışın çapı bulunabilir. Bunun için de odak yüksekliğinin tam ortası minimum spotun seviyesini temsil ettiği için odak yüksekliğinin yarısı (Zn) olarak belirlenir ve o sınırdaki lazer ışın çapı (Dn) olarak bulunur.

Buna göre bel kısmında oluşan odak yüksekliğinin kestiği çap 0.319mm olarak bulunmaktadır.

3.4.5. Optik sistemdeki optik kayıplar ve giderilmesi

3.4.5.1. Optik kayıpların tespiti

Bir ışığın bir ortamdan farklı kırılma indisine sahip bir başka ortama geçerken bir kısmının geri yansıma yaptığı daha önce belirtilmişti. Geri yansıma yapan bu miktar optik bir sistemde optik kayıp olarak anlandırılır.

Deney setindeki optik malzemeler silistir ve kırılma indisi 1064nm dalga boyuna göre 1.45, havanın kırılma indisi ise 1 dir.

Denklem (3.2) kullanılarak bir yüzeyde yaşanan geri yansıma miktarı R= 0,034 olarak bulunur. Yani lazer ışınının optik sistemdeki optik elemanların bir yüzeyindeki etkileşim sonucu o yüzeye etkiyen enerjinin yaklaşık olarak %3.4'ü geri yansıyacaktır. Diğer ortama geçen ışın şiddeti ise %96.6 oranında kalacaktır. Eğer yüzeye gelen enerji şiddeti *I* olursa; yansıyan enerji *R*I*, diğer ortama geçen enerji miktarı ise *T*I* olacaktır.

Sistemde 3 adet mercek ve bir adet fiber optik kablo bulunmaktadır. Dolayısıyla toplam 8 yüzey bulunmaktadır. Buna göre lazer çıkış gücü 100W olarak ayarlandığında Tablo 3.3'teki gibi bir sonuç çıkmaktadır.

Tablo 3.3: Yansıma nedeniyle yaşanan kayıplar

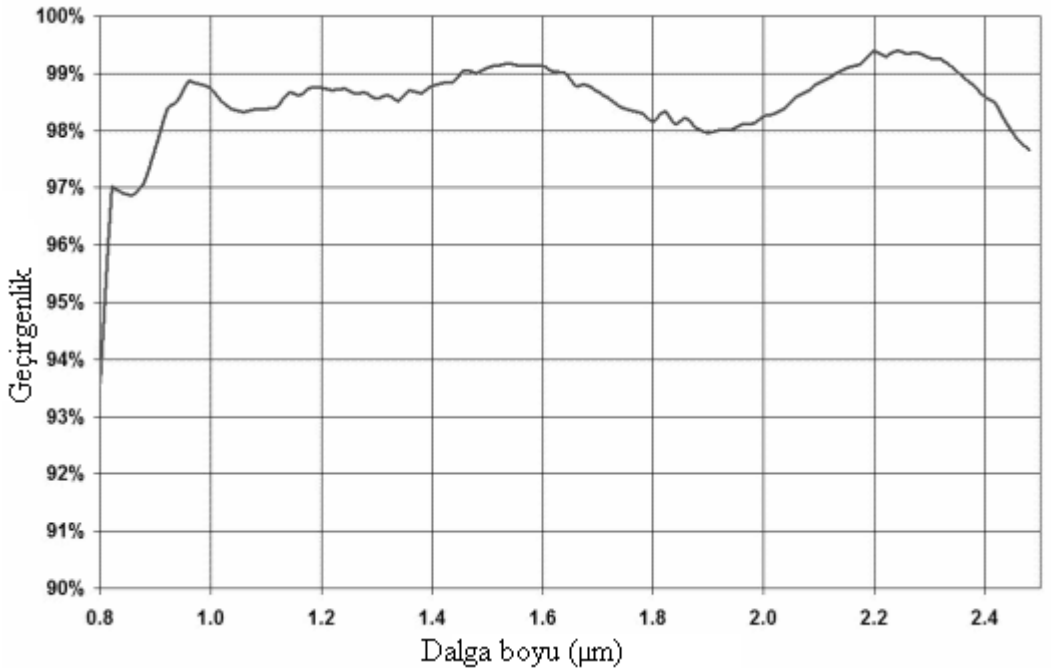
Yüzey	Kayıp miktarı (W)
1.mercek 1. yüzey	3,4
1.mercek 2. yüzey	6,7
Fiber optik kablo 1. yüzey	9,9
Fiber optik kablo 2. yüzey	12,9
2.mercek 1. yüzey	15,9
2.mercek 2. yüzey	18,7
3.mercek 1. yüzey	21,5
3.mercek 2. yüzey	24,2

Soğurma ve saçılmanın ihmal edildiği durumda çıkacak olan bu sonuca göre sistemde sadece optik elemanların geri yansıma özelliğinden dolayı yaşanan enerji kaybı en iyi ihtimalle %24,2'dir.

3.4.5.2. Optik kayıpların giderilmesi

Optik elemanlardaki bu yansıma problemini en aza indirebilmek için optik yüzeylerinin yansımayı engelleyici özelliği bulunan bir tür kaplama malzemesi ile kaplanması gerekmektedir. Bu kaplama yöntemi fiziksel buhar çökeltme/biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD) olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemle, yüksek sıcaklıkta buhar haline getirilen kaplama malzemesinin vakum ortamında optik yüzeyler üzerine fiziksel olarak çökeltilmesiyle 20nm'den başlayan çeşitli kalınlıklarda kaplamalar elde edilebilmektedir. Çok çeşitli kaplama malzemeleri mevcuttur. Bakır (Cu), Nikel(Ni), Magnezyum Oksit(MgO), Magnezyum Florid (MgF2) ve Titanyum Dioksit(TiO2) bunlardan bazılarıdır. Yansıma miktarını en aza indirerek yansıma problemini gidermek amaçlı yapılan bu kaplamalar AR (Anti-Reflection) kaplama olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 3.22'de silis malzemesinden yapılmış bir merceğin üzerine kaplanmış tipik bir AR kaplamanın çeşitli dalga boylarındaki geçirgenlik oranlarını belirten bir grafik bulunmaktadır [94].



Şekil 3.22: AR kaplaması Dalga boyuna göre geçirgenlik oranları [94]

Bu grafikte 1.064µm dalga boyunda ışınım yapan Nd:YAG lazer ışınına göre bir mercekten (her iki yüzü dahil) geçen ışının yaklaşık olarak %1.25'i yansımakta, %98.75'i mercekten geçmektedir. Sadece mercek yüzeyleri yansıma önleyici kaplaması ile kaplanmıştır. Bu durumda deney düzeneğinde bulunan bütün optiklerde yaşanan geri yansıma kaybı %24,2 seviyesinden yaklaşık olarak %10 seviyesine inmesi beklenmektedir.

Yapılan bu değerlendirme sonucunda deney setinde kullanılan mercekler yine aynı laboratuarda bulunan kaplama cihazı ile yansıma önleyici (Anti-reflection-AR) kaplaması yaptırılmış ve kullanılmaya başlanmıştır.

3.5. Toz Besleyici Ünitesi

Parça oluşturma prosesinde kullanılan toz büyüklükleri +43-53µm (43µm-53µm) boyutları arasındaki tozlardır ve istenilen toz akış miktarları göreceli olarak çok az (yaklaşık olarak 1.5-4gr/dak) olduğundan dolayı toz besleyici ünitenin özgün bir tasarıma sahip olması zorunluluğu doğmuştur. Toz metal malzemesinin proses bölgesine istenilen akış miktarlarında beslenebilmesi için özel bir toz besleyici

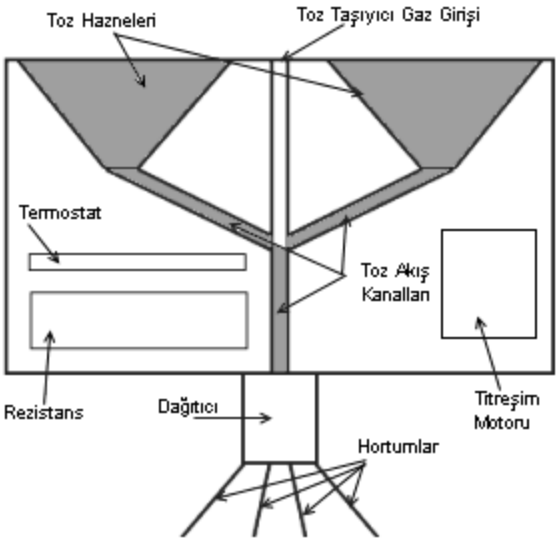
tasarlanıp imal edilmiştir. Bu toz besleyici düşük akış miktarlarında toz besleyebilmesinin yanı sıra iki hazne bulunması dolayısıyla iki farklı türde toz malzemenin de aynı anda istenilen oranlarda beslenebilmesine olanak tanımaktadır.

Toz besleme işleminin gerçekleştirilmesinde çeşitli etkenlerden yararlanılmıştır. Öncelikle toz haznesinde bulunan tozlar kendi ağırlıklarının yardımı ile besleme kanallarına düşmektedir. Besleme kanallarına giren tozlara belli bir debideki argon gazı yardımı ile akıcılık kazandırılır ve tozlar proses bölgesine ulaşıncaya kadar ağırlığın ve gazın yardımı ile taşınır.

Toz besleyici ünitenin içerisindeki besleme kanallarında, toz akış miktarının ayarlandığı mekanik ayar kanallarında ve bağlantı kısımlarında birikme ve tıkanmanın önlenmesi için toz besleyici ünitede bir titreşim sistemi ile titreşim oluşturulur. Bu titreşim aynı zamanda tozun hem hazne içerisinde hem de kanallar içerisinde maruz kaldığı sürtünmeyi büyük oranda azaltarak akıcılığının artmasına da yardımcı olmaktadır. Buna ek olarak, yapılan bu titreşim tozun akışının sürekli homojen olmasını sağlamaktadır. İşlem esnasında CNC tezgâhta üst tabla üzerinde bulunan kısım hareketli olduğu ve toz besleyici ünite de o hareketli kısımda olduğu için eksen hareketlerinin başlangıcı-bitişi ve hareket esnasındaki titreşimler, dur-kalk gibi farklı hareketlerden kaynaklanan düzensizlikler titreşim sistemi ile bertaraf edilmiştir.

Diğer yandan toz ve tozun geçmiş olduğu kanal yüzeylerinin nemlenerek akıcılığını engellemesi dolayısıyla toz besleyici üniteyi bütünüyle ısıtmak için özel bir rezistans yapılarak adapte edilmiş ve gazlı termostat yardımıyla her deneyde sabit sıcaklık elde edecek şekilde ayarlanabilir duruma getirilmiştir. Böylece hem toz malzeme her kullanımda aynı sıcaklık şartlarında kullanılmakta hem de tozun geçtiği bölgelerde nemden dolayı birikme-toplanmanın önüne geçilmektedir.

İki bileşenli toz besleme ünitesi şematik olarak Şekil 3.23'te, gerçek bir resmi Şekil 3.24'te diğer resim ve fotoğrafları ise Ekler'de gösterilmiştir.



Şekil 3.23: İki bileşenli toz besleme ünitesinin şematik görüntüsü



Şekil 3.24: İki bileşenli toz besleme ünitesine ait bir fotoğraf

Toz miktarının ayarlanabilmesi için yine toz besleme sistemi içerisine montaj edilen toz ayar sistemi tasarlanıp üretilmiştir. Bu sistem tozun akış yönüne dik yöndeki düzlemde düzgün kesit elde edebilecek şekilde 0.5mm lik freze ucu ile açılmış kanal bulundurmaktadır. Kanal M8 ince diş vidalama ve yaylı bir sistem vasıtası ile ileri geri hareket ettirilerek kanalın kesitinin lineer bir şekilde büyüyüp küçülmesi sağlanmıştır. Bu şekilde yapılan ayarlamalarda hassasiyet elde edilmiştir.

Toz besleyici sistemde kullanılan ve toza akıcılık kazandıran gazın besleme ünitesinde farklı kısımlarda kullanılması denenmiş, en kararlı seviyenin ayar milinden sonraki kısım olduğu görülerek açılan kanala pnömatik rekorlar vasıtasıyla bağlantısı gerçekleştirilmiştir.

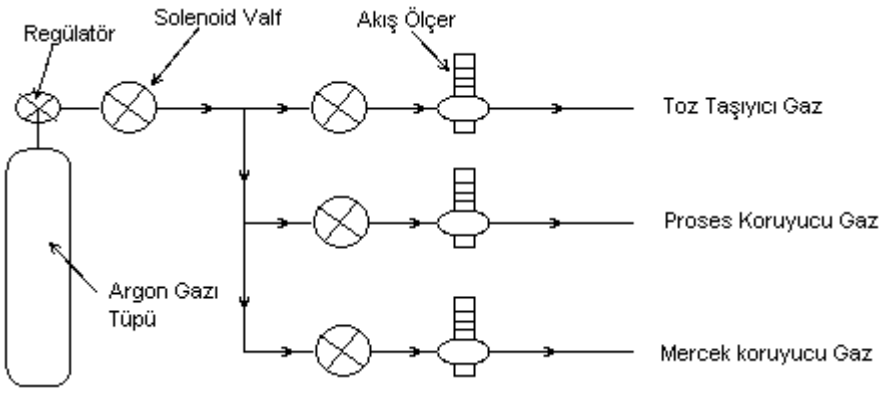
Toz besleme ünitesinin hemen alt kısmında bulunan dağıtıcı yardımı ile toz akış kanallarından çıkan tozlar 4 kola ayrılarak teflon hortumlar yardımı ile nozula iletilir. Dağıtıcı içerisinde bulunan kanallar ince bir matkap ucuyla (1mm) açılmıştır. Böylece toz miktarının çok küçük miktarda olmasından dolayı kanallar arasındaki dağıtımın orantısız olması engellenmiştir. İlk tasarımda açılan kanallar daha büyük çapta olduğundan dolayı böyle bir problem yaşanmıştı. Böylece nozul üzerinde 90º derece aralıklarla bulunan 4 adet giriş bağlantı yerlerine monte edilerek tozun nozula 360º homojen bir şekilde beslenmesi gerçekleştirilmiştir.

Dağıtıcıdan çıkan tozların nozula ulaştırılması 4mm (iç çap=2mm) kalınlığındaki teflon borularla gerçekleştirilmiş, boruların nozula bağlantıları için özel bir rekor tasarlanıp üretilmiş ve montajı gerçekleştirilmiştir. Bu rekorların özelliği boru içerisinde akmakta olan toz malzemesinin herhangi bir çıkıntı ile karşılaşmadan direkt olarak nozula aktarılmasını sağlamaktır.

3.6. Gaz Besleme Ünitesi

Sistemde toz malzemenin taşınması, proses bölgesinin ve odaklama merceğinin korunması için yüksek saflıkta (%99,995) Argon gazı kullanılmıştır. Argon gazı 3 farklı amaç için kullanıldığı ve her amaç için de farklı miktarlarda kullanımı söz konusu olduğundan dolayı 3 farklı akış imkânı sağlayacak bir devre tasarlanıp bakır borular ve pirinç bağlantı elemanları kullanılarak montajı gerçekleştirilmiştir. Akışın tamamen açılıp kapanması butonlarla kontrol edilebilen solenoid vanalar yardımı ile otomatik bir şekilde gerçekleştirilmekte, akış miktarı kontrolü ise akış ölçerler yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Yine gaz ünitesi de özgün bir tasarıma sahiptir.

Akış ölçerlerden çıkan akış miktarı ayarlanmış olan gazlar hortumlar yardımı ile proses odası içerisine gönderilir. Toz taşıyıcı gazın bağlantısı toz besleme ünitesine, proses ve mercek koruyucu gazların bağlantıları ise doğrudan nozul üzerindeki uygun giriş kısımlarına yapılır. Gaz besleme ünitesi şematik olarak Şekil 3.25'te, tesisata ait fotoğraflar ise Ekler'de görülebilir.



Şekil 3.25: Gaz Besleme Ünitesi

3.7. Proses Odası

Prosesin kontrollü ve durağan bir atmosferde gerçekleştirilebilmesi, proses alanının dış ortamdan etkilenmemesi, lazer ışınlarının optik sistemlerden geçerken ve proses bölgesindeki saçılmalarını engellemesi gibi nedenlerden dolayı işlemler bir odacık içerisinde gerçekleştirilmektedir. Odaya fiber optik kablosu, gaz ünitesinin dışarıda olmasından dolayı da gaz hortumları ve toz besleme ünitesinde bulunan rezistans ve elektrik motorunun çalışması için elektrik kablolarının geçiş yapması için çeşitli girişler bulunmaktadır. Kapaklar kapatıldığında içerisinin gözlemlenebilmesi için kızılötesi ışınları filtreleme özelliği olan özel cam takılmıştır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Oluşturulan deney setinde bir takım deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar birbirlerinden ayrı birer başlık altında toplanacaktır. Elde edilen bulgular ve sonuçlar ise ait olduğu bölüm içerisinde irdelenip değerlendirilecektir.

4.1. Yapıyı Oluşturan Tek Bir Yığın Hattının Deneysel Tasarım Teknikleri Kullanılarak Optimizasyonu

4.1.1. Amaç

Lazerli doğrudan metal parça imalatı yönteminin geliştirilmesi aşamasında tek eksende gerçekleştirilen yığma işleminin geometrik olarak kabul edilebilir ölçüler içerisinde olması gerekmektedir. Bir yığının geometrik olarak kabul edilebilir ölçütü farklı durumlarda farklılık arz edebilir. Hem yüksek çözünürlükte ince ayrıntılara sahip parçalar elde edilebilmesi hem de küçük boyutlu parçalar yapılabilmesi için oluşturulan bir yığının mümkün olan en küçük boyutlarda olması gerekmektedir. Bu çalışmada bir yığın geometrisinin Şekil 4.3'te belirtilen ölçülerinin minimum değerlerde gerçekleştirilebilmesi hedeflenmiştir.

4.1.2. Deneysel tasarım prosedürü

Bölüm 2'de belirtildiği gibi lazerli yığma işlemi çok karmaşık ve kararsız bir yapıya sahiptir ve bir geometriyi oluşturmak için etkili olan söz konusu faktörlerin optimize edilmesi gerekmektedir. Karmaşık ve çok sayıda faktörün etkin olduğu bir sistemin optimizasyon işleminin geleneksel bir yaklaşım olan her seferde bir faktör (one factor at a time) yöntemi ile yapılması çok fazla deney yapılması gereken bir süreci gerektirir. Özellikle birbirleri ile etkileşimli olan çok sayıda faktörün bulunduğu sistemlerde optimizasyon işlemi imkansız denecek kadar zordur. Çünkü bir etkileşim bir faktörün etkisinin diğer faktörün seviyesi ile değişmesi ile oluşur. Sistemde etkili

faktörlerin temel etki derecelerinin ve birbirleri ile etkileşimli etki derecelerinin sistematik bir sınıflandırma ile incelenmesi gerekmektedir [95,96].

Belirli kombinasyonlarda oluşturulmuş faktörlerin yığının genişlik, yükseklik ve ağırlığı üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak ve her üç sonucun da minimum olduğu tasarımı bulmak için gerekli faktör kombinasyonun bulunması için deney tasarımı tekniklerinden yararlanılacaktır.

4.1.3. Faktöriyel tasarım

Faktöriyel deney tasarımı stratejisi değişken faktörlerin her birinin birbirleri ile birlikte değerlendirilmelerine olanak tanır [97]. Bu yapılırken her değişkenin olaya etkisinin ne derece olduğunun belirlenebilmesinin yanı sıra değişkenlerin birbirleri ile yaptığı etkileşim sonucunda faktörlerin gösterebileceği farklı davranışlar da belirlenebilir. Bu da faktöriyel tasarım stratejisinin faktörlerin bütün seviyelerinin mümkün olan bütün kombinasyonlarını (birleşimlerini) kullanabilmesinin bir sonucudur [97,98].

Miller, önceden beslemeli direkt parça oluşturulan sistemlerle ilgili lazer spot büyüklüğünün tayin edilmesinde faktöriyel tasarımı kullanmıştır [98]. Diğer pek çok araştırmacı deneysel tasarımı kullanarak farklı konularda bu ve benzer sistemlerin belirli şartları sağlamayı hedefleyen konularda optimum (en uygun) çözüme ulaşmak için deneysel tasarım ve istatistiksel analiz tekniklerini kullanmışlardır [98-105].

4.1.4. Taguchi metodu

Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi optimizasyon metodu ile bir sistemin en iyi performansa sahip olabilmesi için faktör seviyelerinin hangisinin kullanılacağı belirlenebilmektedir. Taguchi metodunda bütün faktörlerin ucuz ve hızlı bir şekilde analiz edilebilmesi için ortogonal tasarım kullanılır. Ortogonal tasarım kullanılarak oluşturulan deney tasarımına göre elde edilen dataların en optimum parametre kombinasyonu elde edilebilmesi için SN oranı (Signal to ratio) kullanılır.

Sonuç değerlerinin istenilen değere sahip olabilmesi için hedef tasarım tipi seçilir. Bu çalışmada bütün değerlerin minimum değere sahip olması istendiği için Smaller is Better (küçüğü en iyisi) tasarımı seçildi. Buna göre Tablo 4.4'te görülen S/N oranı hesabı şu şekilde yapılır [95].

$$S/N\ \ Oranı = -10\,log(\,\Sigma(Y^2)/n) \tag{4.1}$$

Analiz sonucunda oluşturulan modele göre S/N oranı kullanılarak tepki tabloları elde edilir. Bunun için de bir faktörün bir seviyesine ait bütün S/N oranlarının ortalaması alınır ve bu işlem her faktörün bütün seviyeleri için gerçekleştirilir. Örnek verilecek olursa Tablo 4.7'de odak uzaklığı faktörünün ilk seviyesine ait tepki değerini bulmak için Tablo 4.4'ten S1'in ilk seviyesi için hesaplanan 8 adet S/N oranı değerinin ortalaması alınır.

Tepki tabloları her faktör için en iyi seviyenin seçilmesine yardımcı olur. S/N oranı değerinin maksimum olduğu, ortalama değeri (küçüğü en iyisi olduğu için) ise minimum olduğu değerler aranılan hedeflerdir. Tepki tablolarından faktörlerin en yüksekten en düşük etkiye sahip olanı bilgisi de çıkarılabilmektedir.

Ek olarak, Varyans analizleri kullanılarak bir faktörün sonuca ne denli etki yaptığı, hangi faktörün diğerinden ne kadar önemli olduğu ve hangi faktörler birbirleri ile ne derece etkileşimli olduğu konusunda bilgi sahibi de olunabilmektedir.

Diğer yandan Taguchi analizi sonucunda ana faktörlerin ve etkileşimli faktörlerin etkilerinin ne derece olduğunu gösteren bazı grafikler de elde edilir.

4.1.5. Tepki yüzeyi metodu

Tepki Yüzeyi (Response Surface) teknikleri kullanılarak bir sistemin faktörleri ile sonuçları arasında lineer veya lineer olmayan bir ilişki olup olmadığı regresyon analizi gerçekleştirerek elde edilebilir. Bu çalışmada da faktöriyel tasarım ile oluşturulmuş olan deney kombinasyonu ile elde edilen sonuçlara göre regresyon

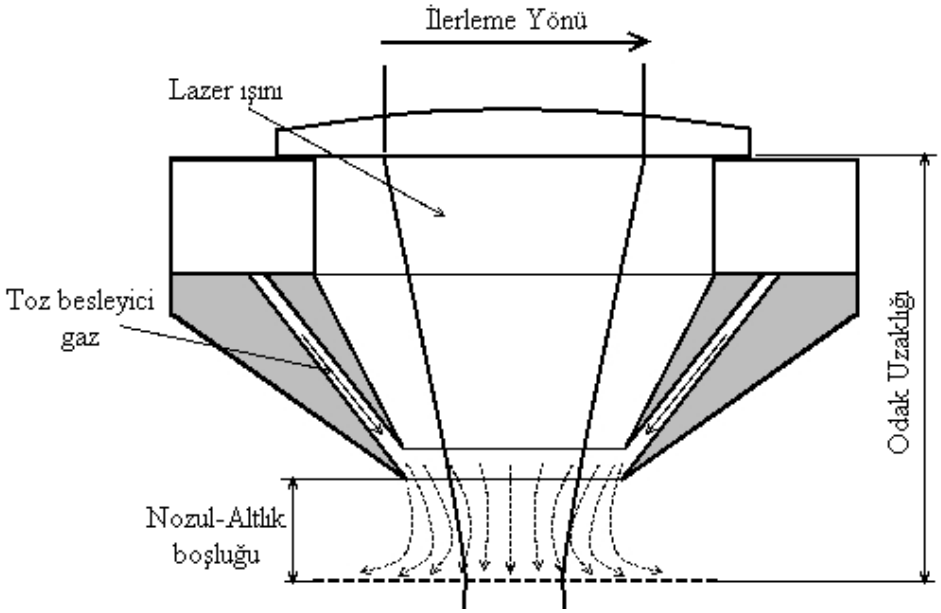
analizi uygulayarak uygun bir model oluşturulması ve elde edilen bazı grafiklerle sonuçların davranışı hakkında bilgi sahibi olmak hedeflenmiştir.

4.1.6. Değişken ve sabit tutulan faktörler

Yığın yapısının boyutlarını etkileyen çok sayıda faktör vardır. Şimdiye kadar yapılan deneysel çalışmalardan edinilen tecrübeye göre bazı faktörler sabit tutularak hedeflenen faktörlerin ne oranda etkisinin olduğunun tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu faktörler altlık yüzeyine etki eden lazer ışınının odak uzaklığı, ilerleme hızı, toz besleyici gaz debisi ve nozul ile altlık malzeme arasındaki aralık mesafesidir. Şekil 4.1'de görülen bu faktörlerin alacağı değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablodan da görüldüğü gibi ilerleme hızı, gaz debisi ve nozul-altlık arası mesafe değerlerinde sadece iki seviye, odak uzaklığı parametresinde üç seviye belirlenmiştir. Bu üç seviyenin belirlenme şekli lazer ışınının odaklanmış olduğu bölgedeki bel geometrisine (waist) bağlı olarak belirlenmiştir. Kombinasyonda odak uzaklığının alacağı ikinci (orta) değer bıçak kenarı ölçümü ile ölçülüp hesaplanmış olan bel geometrisinin en dar seviyesi yani minimum odak çapının oluştuğu gerçek odak uzaklığı değeridir. Şekil 4.1'e göre lazer ışınının altlık malzemesinin üst yüzeyine etki ettiği seviye minimum odak büyüklüğünün oluştuğu seviyedir.

Birinci ve üçüncü değerler ise eşit mesafelerde olmak üzere altlık malzemenin merceğe gerçek odak uzaklığından daha yakın ve daha uzak mesafelerdir. Odak uzaklığının bu üç seviyedeki etkisinin görülmesinin hedeflenmesi hem altlık malzemesinin üst seviyesine hem de toz bulutuna etkiyen lazer ışınının hangi seviyede ne şekilde etkidiğinin gözlenmek istenmesidir. Ayrıca, özellikle toz malzemenin henüz altlık malzeme üzerine düşmeden lazerle temas ettiği kısımda ortaya çıkacak farklı sonuçlar lineer veya lineer olmayan bir durum olup olmadığını ortaya çıkaracaktır.

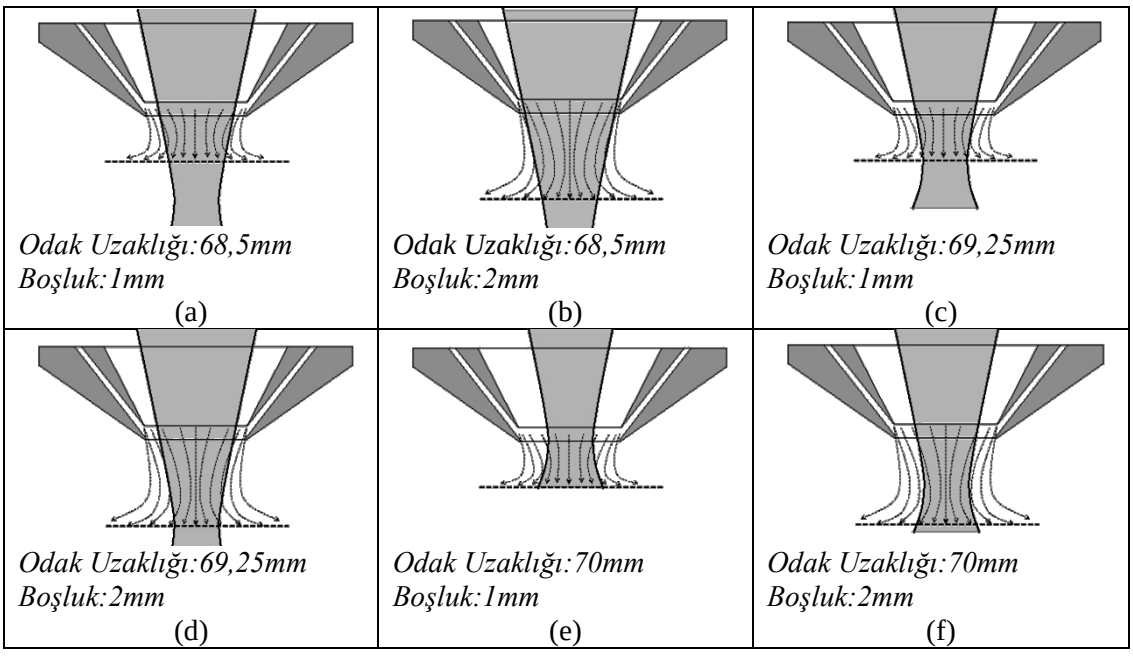


Şekil 4.1: Lazerli doğrudan metal parça imalatı sistemi nozul kısmı

Tablo 4.1: Deneysel Kontrol Parametrelerinin tanımı

		Seviye		
Sembol	Kontrol Faktörleri	1	2	3
F	Odak Uzaklığı (mm)	68,5	69,25	70
H	Nozul-Altlık Boşluğu (mm)	1	2	-
D	Toz besleyici Gaz Debisi (lt/dk)	0,8	1	-
V	İlerleme Hızı (mm/sn)	10	14	-

Kontrol faktörlerinin oluşturacağı farklı kombinasyonlar Şekil 4.2'de sunulmuştur.



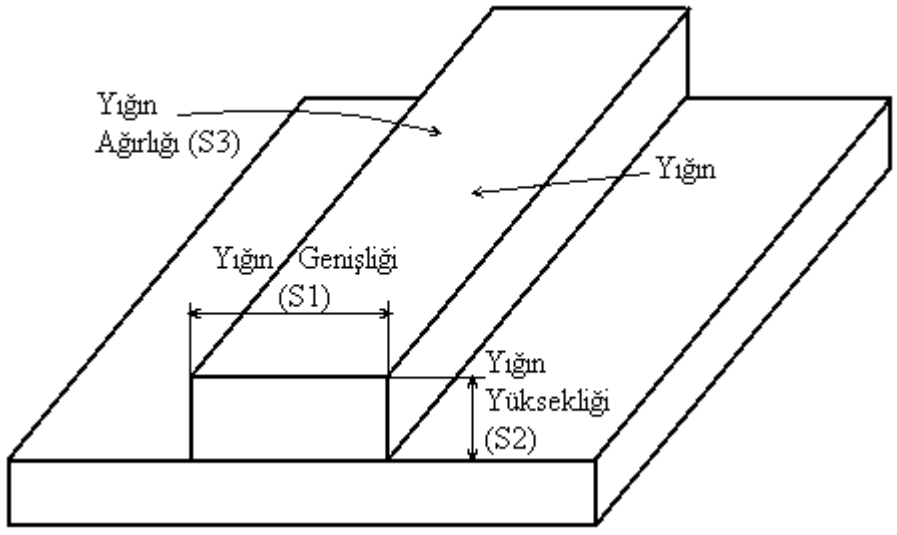
Şekil 4.2: Deney faktörlerinin oluşturduğu kombinasyon

Farklı değerlerinin test edileceği bu faktörlerin haricinde sabit tutulan faktörler ise Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Sabit faktörler

Faktör	Değeri
Lazer gücü (W)	77,5
Toz boyutu (µm)	+45-53
Altlık yüzey kalitesi (R_a-mikron) (Çizgiler hat oluşumuna göre dik yönde)	0,2-0,3
Mercek koruyucu gaz debisi (l/dk)	1
Proses koruyucu gaz debisi (l/dk)	1
Toz debisi (gr/dk)	2,6-2,9
Toz sıcaklığı (^{0}C)	40
Hat uzunluğu (mm)	10
Toz malzemesi	316L paslanmaz çelik (Gaz atomize ile üretilmiş)

Bu faktörlere karşılık deney sonucunda elde edilecek numuneler üzerinde yapılacak ölçümler ise yığma ile oluşturulan dolgunun genişlik değeri (*s1*), yükseklik değeri (*s2*) ve dolgunun toplam ağırlığıdır (*s3*). Yığına ait geometrik ölçülendirmeler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Yığının geometrik ölçü bilgisi

4.1.7. Deneyin faktöriyel tasarımı

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi, tasarımda 4 adet değişken parametre bulunmakta ve bunlardan bir tanesi 3 farklı değer almakta, diğerleri ise 2 farklı değer almaktadır. Farklı seviyelere sahip faktörler olduğundan dolayı genel tam faktöriyel tasarımı kullanılması gerekmektedir. Belirtilen seviyelere göre tam faktöriyel tasarımı Tablo 4.3: 'te görüldüğü gibi olmakta ve farklı faktör değerlerinde 24 adet deney yapılması gerekmektedir.

Tablo 4.3: Tam Faktöriyel Tasarımı

Den.	Faktörler					Den.	Faktörler			
No	f	h	d	v		No	f	h	d	v
1	f_1	h_1	d_1	v_1		13	f_2	h_2	d_1	v_1
2	f_1	h_1	d_1	v_2		14	f_2	h_2	d_1	v_2
3	f_1	h_1	d_2	v_1		15	f_2	h_2	d_2	v_1
4	f_1	h_1	d_2	v_2		16	f_2	h_2	d_2	v_2
5	f_1	h_2	d_1	v_1		17	f_3	h_1	d_1	v_1
6	f_1	h_2	d_1	v_2		18	f_3	h_1	d_1	v_2
7	f_1	h_2	d_2	v_1		19	f_3	h_1	d_2	v_1
8	f_1	h_2	d_2	v_2		20	f_3	h_1	d_2	v_2
9	f_2	h_1	d_1	v_1		21	f_3	h_2	d_1	v_1
10	f_2	h_1	d_1	v_2		22	f_3	h_2	d_1	v_2
11	f_2	h_1	d_2	v_1		23	f_3	h_2	d_2	v_1
12	f_2	h_1	d_2	v_2		24	f_3	h_2	d_2	v_2

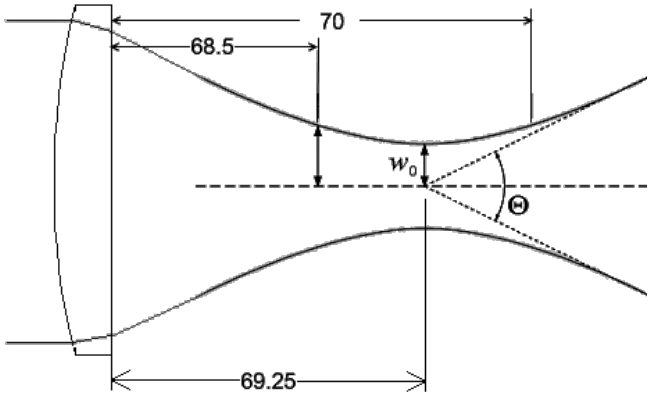
Elde edilen bu tasarım Taguchi ortogonal tasarımıdır ve $L24(3^1X2^3)$ şeklinde adlandırılabilir. Bu notasyon, deney sayısının 24 adet olduğunu, bir faktörün 3 farklı seviyeye 3 faktörün ise 2 farklı seviyeye sahip olduğunu gösterir [95].

4.1.8. Deneyin yapılış metodu

Deneyler, Tablo 4.2'de belirtilen faktörlerin sabit tutulması ve faktöriyel tasarımda ortaya çıkan değişken faktör birleşimleri kullanılarak Şekil 4.3'te gösterilen şeklin oluşturulması ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi lazer ışını altlık yüzeyinin üst seviyesine odaklanmıştır ve bu seviye odak uzaklığı olarak adlandırılarak üç farklı değer alması sağlanmıştır. Odak uzaklığı faktörünün ara değeri olan 69.25mm seviyesi (f_2) lazer ışınının

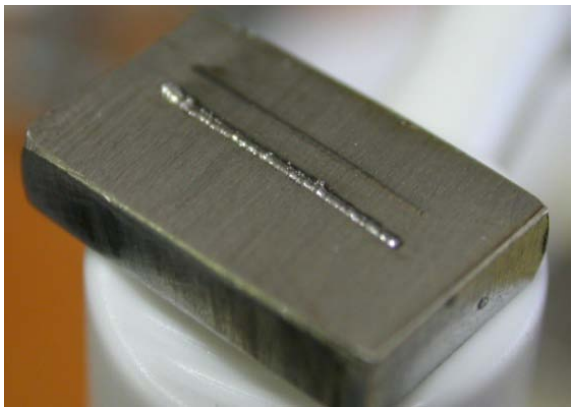
minimum spot büyüklüğünün elde edildiği seviyedir, Şekil 4.4. Bu seviyede spot çapı 0.3mm büyüklüğündedir ve bu değer 'knife-edge' yöntemi ile ölçülerek bulunmuştur. Bu metot çerçevesinde elde edilen ölçüm değerleri Mathematica 6.0 ve Mathcad 14 programları yardımı ile modellenmiş ve minimum spot büyüklüğünün yanı sıra odak uzaklığı parametresinin en düşük ve en yüksek seviyeleri olan f_1 ve f_3 değerleri için de spot büyüklüğü hesaplanmıştır. Bu seviyeler minimum spotun oluştuğu seviyeye eşit mesafelerde oluştuğu ve bel bölgesinde lazer ışınının davranışı göz önünde bulundurulduğunda oluşacak spot büyüklükleri aynı olacaktır. Nitekim hesaplanan değerler de birbirine eşit çıkmıştır ve spot bu seviyelerde 0.475mm büyüklüğündedir. Bu durum lazer ışınının her iki eksende de ideal bir gauss eğrisine sahip olduğu durumda geçerlidir. Bu çalışmada yapılan ölçüm ise tek bir eksene dayanmaktadır.



Şekil 4.4: Lazer ışını odak bel bölgesi, odak uzaklığının aldığı farklı değerler

Şekil 4.5'te 2 nolu deneyde yapılmış olan yığının resmi bulunmaktadır. Resimden de görüldüğü gibi deneyler boyutları yaklaşık olarak 13.5*9.5*3mm ölçülerinde kesilip yüzeyi belirtilen hassasiyette belirli bir yönde zımparalanması ile oluşturulmuş olan paslanmaz çelik (316L) malzemeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

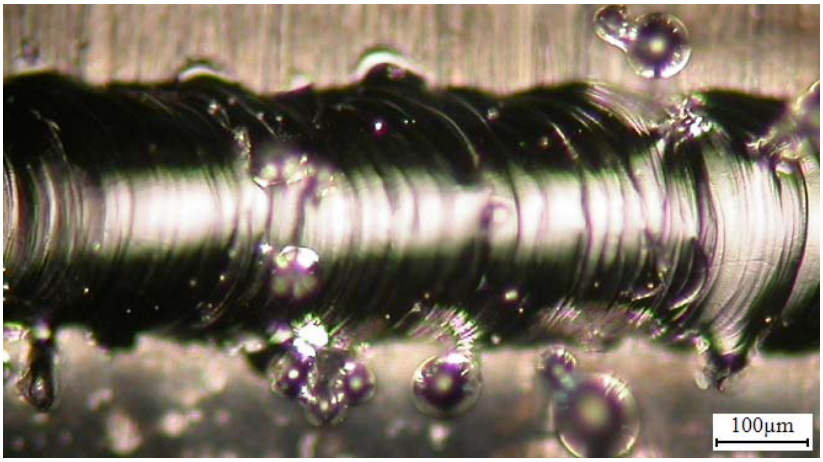
Hazırlanan altlık malzemelerine ilgili deney numarası verilerek markalanmış ve temizlendikten sonra hassas terazide tartılarak altlığın üzerinde yığın geometrisi oluşturulmadan önceki ağırlığı ölçülmüştür.



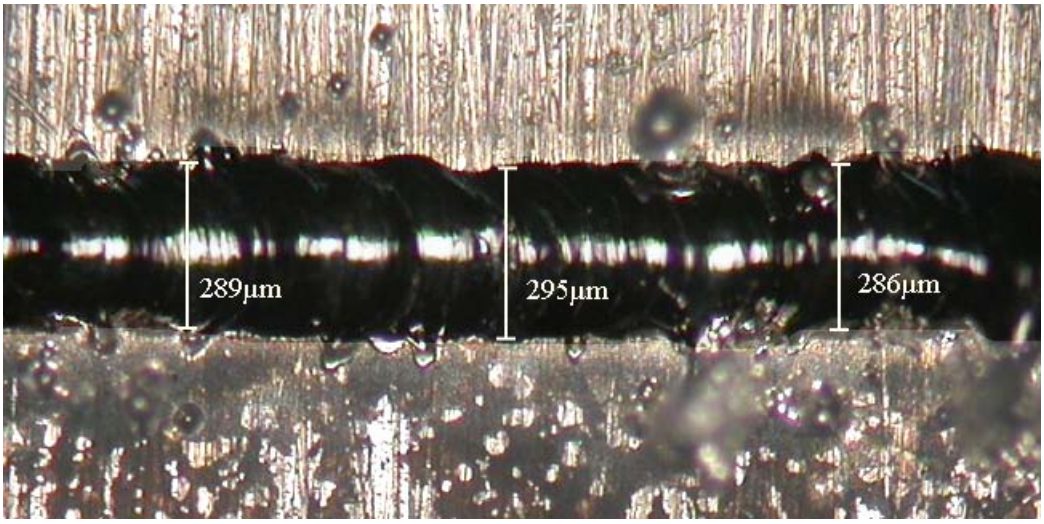
Şekil 4.5: 2 Nolu deneye ait numunenin resmi

4.1.9. Numunelerin ölçülmesi ve sonuçların grafiksel olarak gösterilmesi

Elde edilen numuneler 50:1 ve 100:1 büyütme ile optik mikroskop altında incelenmiş ve yığın üzerinde birkaç farklı bölgeden görüntü analiz programları kullanılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Böylece yığın üzerinde oluşmuş düzensizliklerden kaynaklanan hata göz önünde bulundurularak yığın genişliği için ortalama bir ölçüm değeri bulunmuştur. Şekil 4.6'da 100:1 büyütme ile bir yığının üstten görüntüsü, Şekil 4.7'de ise 50:1 büyütülmüş görüntü üzerinde yapılan ölçümler görülmektedir.

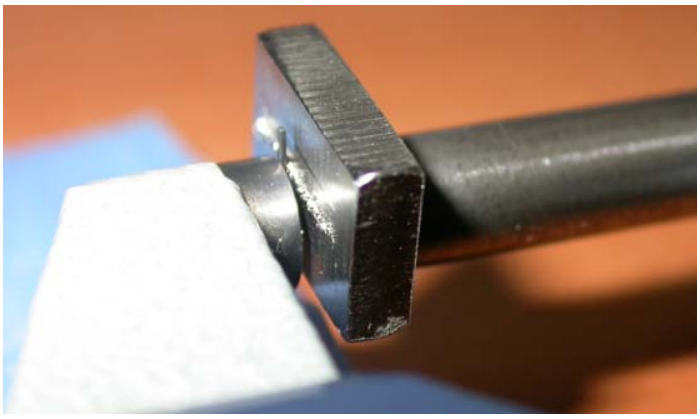


Şekil 4.6: Bir yığının üstten mikroskop ile büyütülerek (100:1) elde edilen bir görüntüsü



Şekil 4.7: Mikroskop ile alınan görüntü üzerinde yığın genişliği ölçümü

Yığın yüksekliği değeri 0,001mm ölçüm hassasiyetine sahip dijital mikrometre ile ölçülmüştür. Yığın üzerinde oluşan girinti ve çıkıntıların ölçüm hatası oluşturmasını engellemesi için 0.37mm çapında pürüzsüz bir mil (4mmlik matkap ucu) çene ile numune arasına sıkıştırılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir, Şekil 4.8.



Şekil 4.8: Yığın yüksekliği ölçümü

Diğer yandan yığın üzerinde birikmiş tozların temizlenmesinden sonra numune hassas terazide tekrar tartılmış ve yığın neticesinde numunede oluşan ağırlık farkı yığının ağırlığı olarak bulunmuştur. Ölçülen bu değerler Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4: Numunelere ait ölçülen sonuçlar ve S/N oranları

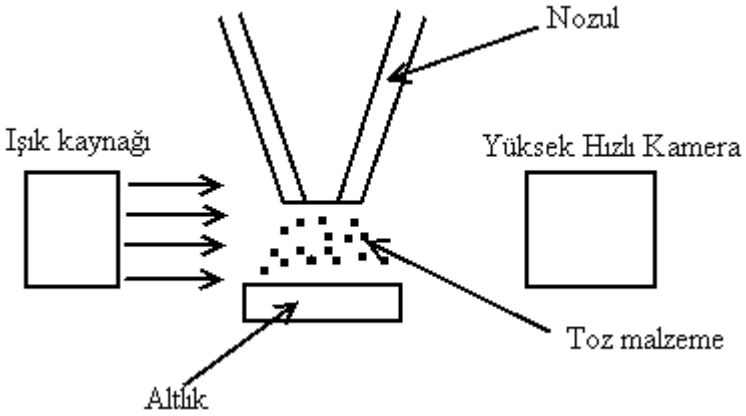
Deney No	Faktörler				S1 (µm)	S2 (µm)	S3 (mg)	S/N (S1)	S/N (S2)	S/N (S3)
	f	h	d	v						
1	f_1	h_1	d_1	v_1	397	280	9,6	-51,9758	-48,9432	-19,6454
2	f_1	h_1	d_1	v_2	335	190	5,5	-50,5009	-45,5751	-14,8073
3	f_1	h_1	d_2	v_1	290	190	5,5	-49,248	-45,5751	-14,8073
4	f_1	h_1	d_2	v_2	262	150	5,7	-48,366	-43,5218	-15,1175
5	f_1	h_2	d_1	v_1	276	140	4,3	-48,8182	-42,9226	-12,6694
6	f_1	h_2	d_1	v_2	254	90	3	-48,0967	-39,0849	-9,54243
7	f_1	h_2	d_2	v_1	310	115	3,1	-49,8272	-41,214	-9,82723
8	f_1	h_2	d_2	v_2	268	52	1,9	-48,5627	-34,3201	-5,57507
9	f_2	h_1	d_1	v_1	370	230	7,4	-51,364	-47,2346	-17,3846
10	f_2	h_1	d_1	v_2	346	195	4,7	-50,7815	-45,8007	-13,442
11	f_2	h_1	d_2	v_1	292	48	1,4	-49,3077	-33,6248	-2,92256
12	f_2	h_1	d_2	v_2	273	42	1,2	-48,7233	-32,465	-1,58362
13	f_2	h_2	d_1	v_1	292	140	3	-49,3077	-42,9226	-9,54243
14	f_2	h_2	d_1	v_2	278	70	2	-48,8809	-36,902	-6,0206
15	f_2	h_2	d_2	v_1	305	75	2,7	-49,686	-37,5012	-8,62728
16	f_2	h_2	d_2	v_2	273	43	1,2	-48,7233	-32,6694	-1,58362
17	f_3	h_1	d_1	v_1	511	350	13,8	-54,1684	-50,8814	-22,7976
18	f_3	h_1	d_1	v_2	451	230	6,7	-53,0835	-47,2346	-16,5215
19	f_3	h_1	d_2	v_1	273	160	6,1	-48,7233	-44,0824	-15,7066
20	f_3	h_1	d_2	v_2	262	72	2	-48,366	-37,1466	-6,0206
21	f_3	h_2	d_1	v_1	327	210	5,9	-50,291	-46,4444	-15,417
22	f_3	h_2	d_1	v_2	297	130	3,9	-49,4551	-42,2789	-11,8213
23	f_3	h_2	d_2	v_1	281	140	3,3	-48,9741	-42,9226	-10,3703
24	f_3	h_2	d_2	v_2	251	75	2,3	-47,9935	-37,5012	-7,23456

4.1.10. Toz davranışı ve hızının ölçülmesi

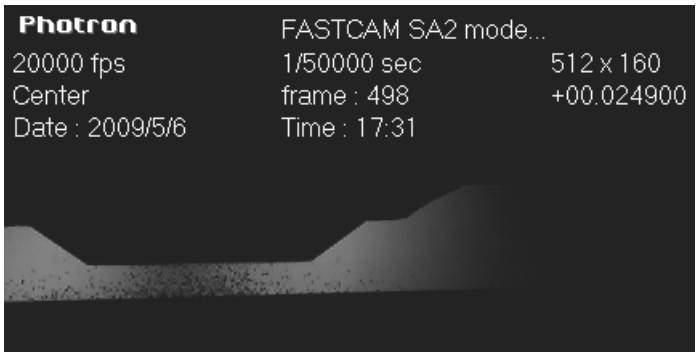
Gaz debisi ve nozul-altlık boşluğu değerlerinin değişmesi ile toz malzemenin proses bölgesindeki hızı da gazın hızına bağlı olarak değişiklik gösterecektir.

Toz hızlarının farklı kombinasyonlardaki davranışları yüksek hızlı kayıt kameraları kullanılarak gözlenmiştir. Saniyede 20.000 resim çekebilen yüksek hızlı bir kamera (Photron) ile lazer uygulaması gerçekleştirilmeden sadece toz malzeme besleme sırasında çekimler gerçekleştirilmiştir. Çekimlerde nozulun, ışık kaynağı ile

kameranın arasına gelecek şekilde yerleştirilmesi ile siluet görüntüler elde edilmiştir. Fotoğraflama tekniğini anlatan şematik görüntü Şekil 4.9'da, yapılan çekimlerden elde edilen bir görüntü ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Fotoğraflama tekniği



Şekil 4.10: Hızlı kamera ile çekilen toz besleme işlemi

Hızlı kamera çekimleri ile elde edilen fotoğraflarda bir tozun nozulun uç kısmından çıkması ile aldığı yol kare kare izlenebilmektedir. Bu durum üzerine toz hızının hesaplanması için şu şekilde bir yol izlenmiştir;

1. Öncelikle net olarak hareketi takip edilebilen ve lazerin etki alanı içerisindeki bir bölgeden bir toz seçildi
2. İlk karedeki görüntüsü kaydedildi
3. 10 kare sonraki görüntüsü kaydedildi

4. Her iki resim bir resim düzenleyici yazılımı kullanılarak üst üste çakıştırılarak noktaların yerleri tespit edildi
5. Görüntü analiz programı ile tespit edilen konumlar arasındaki uzaklık ölçüldü (x)
6. 10 kare arasındaki zaman farkı hesaplandı (t=0,00005sn*10=0,0005sn)
7. Tozun 10 kare süresi boyunca hareket ettiği toplam uzaklığın geçen zamana oranı hesaplandı (v=x/t)
8. Bu işlem birden çok sayıda toz için gerçekleştirilerek sonuçların ortalaması alındı ve bu şekilde tozun hızı hesaplanmış oldu

Bu prosedüre göre toz hızları çeşitli kombinasyonlara göre Tablo 4.5'teki şekilde oluşmuştur.

Tablo 4.5: Hızlı kayıt tekniği ile ölçülen toz hızı kombinasyonu

Boşluk ve Gaz Debisi Kombinasyon		Toz Hızı (mm/sn)
h1	d1	799
h1	d2	836
h2	d1	855
h2	d2	1085

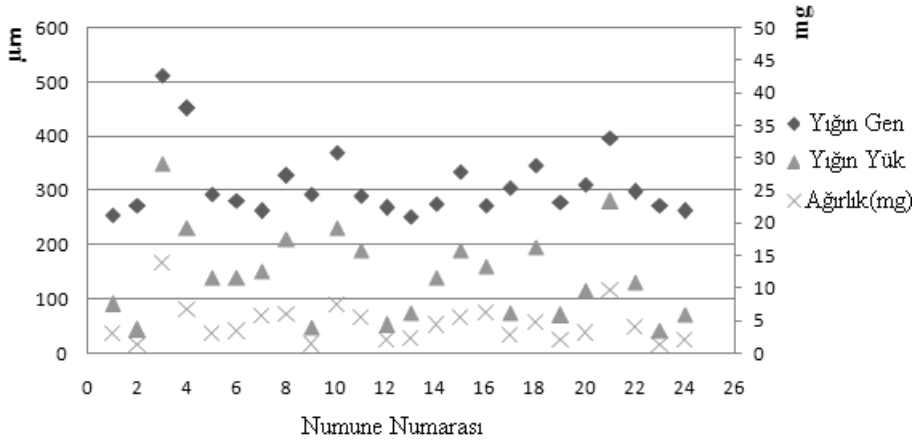
Tablo 4.5'ten de görüldüğü gibi gaz debisi arttıkça toz hızı da artmaktadır. Diğer yandan yine tabloya göre nozul altlık boşluğu da arttıkça yine toz hızı artmaktadır. Diğer bir değişle boşluk azaldıkça hız da azalmaktadır. Fakat burada karmaşık bir durum bulunmaktadır. Normalde boşluğun azalması ile tozun gazla birlikte çıkış yapacağı radyal yöndeki alan azalmakta bu da bu kısımda bulunan gaz hızını ve ilişkili olarak toz hızını artırması gerekmektedir. Hızlı kamera kayıtlarında da bu durumun beklendiği şekilde olduğu gözlenmiştir. Fakat bunun lazerin etki etmediği kenar kısımlara has bir durum olduğu görülmüştür. Belirli bir açı ile çevresel olarak tozların bir gaz basıncı ile aynı noktaya hareket etmesi esnasında merkezde sıkışan gazların yanal boşluklardan hızlı bir şekilde çıkışına toz malzemenin tamamının aynı tepkiyi vermediği gözlenmiştir. Yanal kısımlardaki yüksek hızlı gaz akışı merkeze beslemesi gerçekleştirilen tozlar için perdeleme etkisi yapmış ve bunun sonucunda lazerin etkili olduğu orta kısımlarda tozların bir kısmı hapsolarak fazla toz

beslemesine neden olmuştur. Bu durum elde edilen hızlı çekimlerde çok açık bir şekilde gözlenmiştir.

Tozun düştüğü kısımda birikme yaşanmayan kombinasyonlarda bütün tozlar etrafa yayılmış olmasına rağmen kesit azalması yaşanan kombinasyonlarda tozların iç kısmında hapsolması olayı prosesin başladığı ilk anlardan itibaren başlayıp süreye bağlı olarak hapsolan toz miktarında sürekli artışın olduğu gözlenmiştir.

4.1.11. Sonuçların grafiksel ifadesi

Yığının geometrik yapısı (Şekil 4.3) göz önünde bulundurulduğunda yığın genişliği arttıkça yığın yüksekliğinin ve yığın ağırlığının artacağı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlardan beklenen bu ilişkilerin beklendiği şekilde olduğu Şekil 4.11'de grafiksel olarak görülmektedir.



Şekil 4.11: Yığın genişliği, yığın yüksekliği ve yığın ağırlığı değerlerinin grafiksel gösterimi

4.1.12. Faktöriyel tasarım ve taguchi analizi

Deney sonucunda ölçülen tepki (cevap) değerleri Tablo 4.4'te görüldüğü gibi yığın genişliği (s1), yığın yüksekliği (s2) ve yığın ağırlığı (s3) olmak üzere 3 adettir. Her bir değer için ayrı ayrı analiz ve irdeleme gerçekleştirilecektir. Analizler Minitab yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

4.1.12.1. Yığın genişliği ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları

Yığın genişliği için yapılan Taguchi analizi sonucunda elde edilen Varyans analiz sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Varyans analiz sonucunda en önemli istatistiksel değer olasılık (P) değeridir. Faktöre göre hesaplanan bu değer, yanılgı düzeyinden (α-level, Level of Significance) düşük çıktığı durumlarda o faktörün önemli olduğu anlaşılır [95]. Burada yanılgı düzeyi 0.05'tir.

Tablo 4.6: Yığın genişliği için Varyans analizi değerleri

SN Oranı için Varyans Analizi (S1)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
f	2	2,1773	2,1773	1,0886	9,71	0,006
h	1	10,6562	10,6562	10,6562	95,01	0,000
d	1	17,0400	17,0400	17,0400	151,92	0,000
v	1	4,2993	4,2993	4,2993	38,33	0,000
f*h	2	1,0802	1,0802	0,5401	4,82	0,038
f*d	2	7,2241	7,2241	3,6120	32,20	0,000
f*v	2	0,2025	0,2025	0,1013	0,90	0,439
h*d	1	13,5861	13,5861	13,5861	121,13	0,000
h*v	1	0,0021	0,0021	0,0021	0,02	0,893
d*v	1	0,0004	0,0004	0,0004	0,00	0,955
Residual Error	9	1,0095	1,0095	0,1122		
Total	23	57,2776				

Tablo incelendiğinde ana faktörlerden boşluk, debi ve ilerleme faktörleri başta olmak üzere bütün faktörlerin sonuca direkt etkisinin olduğu anlaşılmaktadır ($P<0.05$).

Diğer yandan faktör etkileşimlerine bakıldığında nozul boşluğu-gaz debisi ve odak uzaklığı-gaz debisi etkileşimli faktörlerinin yine önemli miktarda yığın genişliğini etkileyen etkileşimli faktörler olduğu anlaşılmaktadır. Bundan sonra odak uzaklığı-boşluk etkileşimli faktörünün yine sonuçta rol oynadığı görülmektedir. İlerleme hızı faktörü sonuca tek başına önemli oranda etki etse bile diğer bütün parametrelerle kurduğu etkileşimli faktörlerinin sonuca etkili olmadığı anlaşılmaktadır.

Tepki tablosu ise Tablo 4.7'deki gibi oluşmuştur.

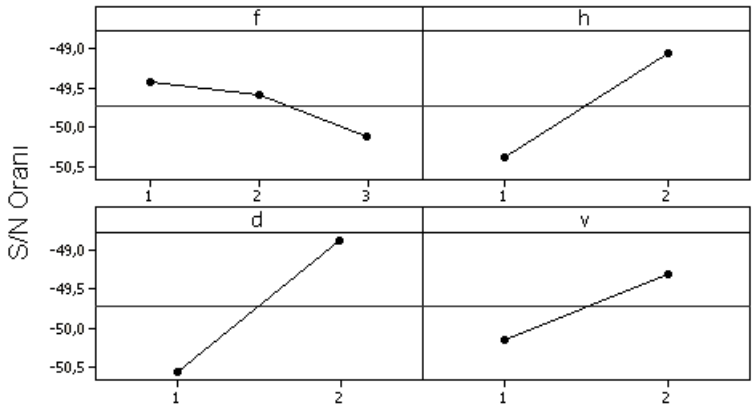
Tablo 4.7: Tepki Tablosu (Yığın Genişliği için)

SN Oranı için Tepki Tablosu (Küçüğü en iyisi)

Level	f	h	d	v
1	-49,42	-50,38	-50,56	-50,14
2	-49,60	-49,05	-48,88	-49,29
3	-50,13			
Delta	0,71	1,33	1,69	0,85
Rank	4	2	1	3

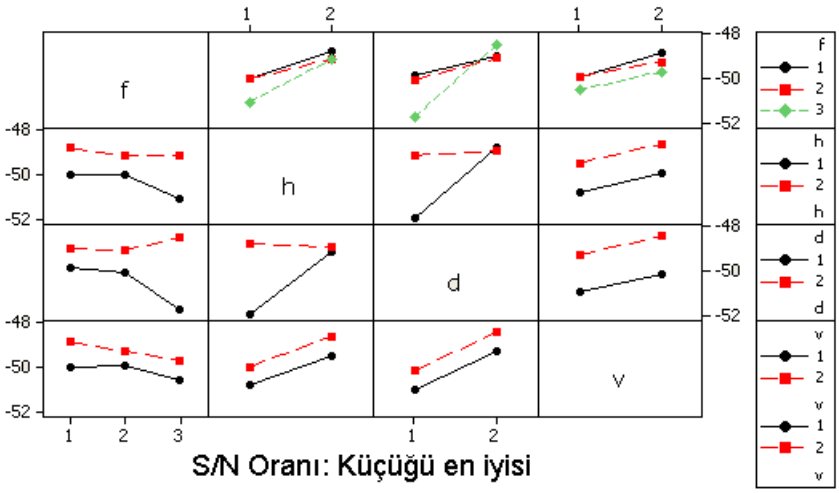
Önemine göre faktörlerin sıralaması (S/N oranına göre) başta gaz debisi olmak üzere boşluk, ilerleme ve odak uzaklığı şeklinde olmaktadır.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te faktörlerin tek olarak ve birbirleri ile etkileşimli olarak sonuca etkileri grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiği oluşturan çizginin dikliği o faktörün ne derece sonuca etkili olduğunu gösterir.



Şekil 4.12: Faktörlerin yığın genişliğine direkt etkileri

Etkileşim grafiklerine has olarak ise her iki grafik çizgisinin birbirlerine göre yapmış oldukları açının büyüklüğü ilgili faktörlerinin etkileşimlerinin sonuca etkisinin fazla olduğunu gösterir. Çizgiler arasında paralellik veya paralelliğe yakın bir durum var ise o faktör ilişkisinin sonuca etkisinin olmadığı anlaşılır. Şekil 4.12'de boşluk ve gaz debisi faktörlerinin önemli etkisi açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.13: Faktörlerin yığın genişliğine etkileşimli etkileri

Taguchi analiz sonucu belirtilen hedeflere göre hangi parametrenin seçilmesi gerektiği bilgisini de verir. Bu da tepki tablolarından çıkarılabilir ve Şekil 4.12'deki grafiklerden de rahatlıkla anlaşılabilir. S/N oranı değerinin yüksek olduğu değer seçildiğinde amaç fonksiyonuna göre optimum kombinasyon sağlanabilir. Bu durumda tercih edilecek seviyeler Tablo 4.8'de görüldüğü şekilde olmaktadır.

Tablo 4.8: Tercih seviyeleri (Yığın Genişliği için)

Tablo	Odak	Boşluk	Debi	İlerleme
S/N oranı	1	2	2	2

Yani odak uzaklığının 68.5mm, boşluğun 2mm, gaz debisinin 1 lt/dk ve ilerleme hızının ise 14mm/sn olduğu kombinasyonun tercih edilmesi gerekmektedir.

Oluşturulan yığının genişlik sonucuna göre tepki yüzeyi analizi uygulandığında ise Tablo 4.9'da görülen Varyans analizi elde edilir. Burada genişlik sonuçlarına göre bir model uydurulmak istenmiştir. Uydurulacak modelin lineer ve lineer olmayan unsurlarının önem derecesine bakılacaktır. P değerleri incelendiğinde elde edilecek modelde lineer ve etkileşimli faktörler önem arz etmekte, lineer olmayan unsurların ise önemsiz olduğu, sonuca etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Yani oluşturulan modelde bir eğrisellik bulunmamaktadır.

Tablo 4.9: Tepki yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Yığın genişliği için)

s1 için Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	87654,3	87654,3	7968,57	13,07	0,000
Linear	4	53958,1	9752,5	2438,11	4,00	0,027
Square	1	728,5	728,5	728,52	1,19	0,296
Interaction	6	32967,7	32967,7	5494,61	9,01	0,001
Residual Error	12	7317,6	7317,6	609,80		
Total	23	94971,8				

Diğer yandan yapılan regresyon sonucunda Tablo 4.10'da görüldüğü gibi bir tablo elde edilir. Burada yine P değerlerine bakılarak modelde bulundurulması tavsiye edilmeyen (0.05'den büyük olan) değerler hesaplamaya dâhil edilmeden tekrar analiz yapılarak regresyon analizi gerçekleştirilir. Tablo 4.10'da uydurulan modelin %87,54 (R^2(adj)) oranında sonuç dataları ile örtüştüğü görülmektedir.

Burada dikkat edilirse odak uzaklığı-boşluk etkileşimli faktörünün olasılığı 0.088 olmasına rağmen modele alınması uygun görülmüştür. Bunun iki nedeni vardır. İlk olarak Taguchi analizinde bu değerin sonuç üzerinde etkili olduğu gözlenmişti, (Tablo 4.6, P=0,038). Buna ek olarak R^2(adj) değerinin odak uzaklığı-boşluk etkileşimli faktörünün çıkarılarak elde edilen modelde %85'e düştüğü hesaplanmıştır.

Tablo 4.10: Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Yığın genişliği için)

s1 için tahmini regresyon katsayıları

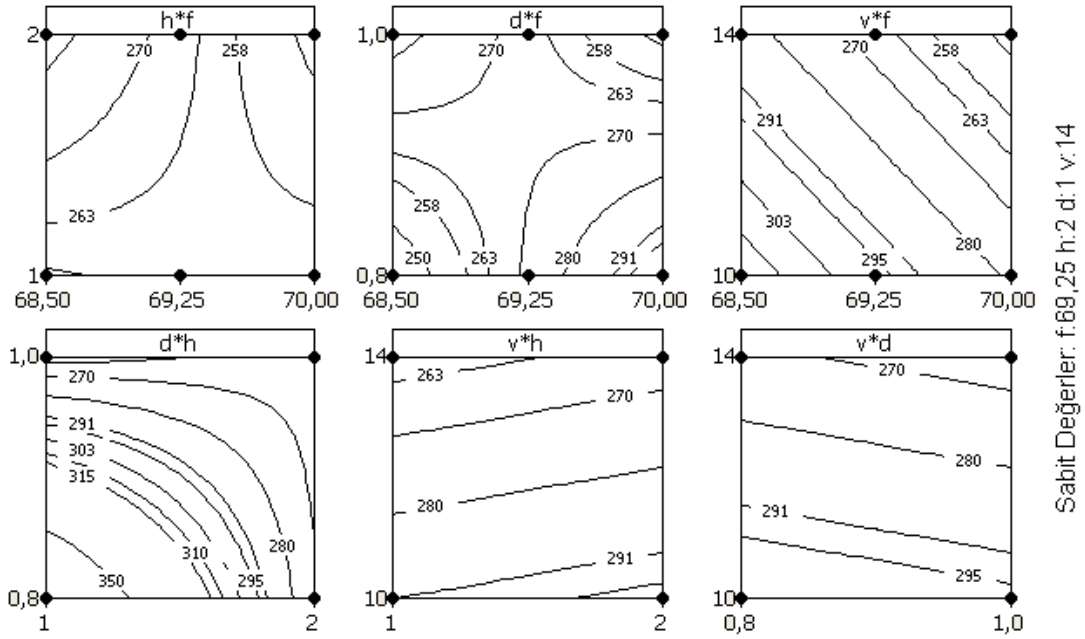
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-22866,4	4996,41	-4,577	0,000
f	353,3	72,12	4,898	0,000
h	1308,7	1050,50	1,246	0,231
d	21099,8	5237,78	4,028	0,001
v	-7,8	2,31	-3,366	0,004
f*h	-27,5	15,12	-1,819	0,088
f*d	-322,5	75,61	-4,266	0,001
h*d	601,7	92,60	6,498	0,000

S = 22,6819 R-Sq(adj) = 87,54%

Bu sonuçlara göre yığın genişliği sonuçları yapılan regresyon sonucunda belirtilen hata payı içerisinde oluşturulan model şu şekildedir.

$$s1=-22866,4+353,3f+1308,7h+21099,8d-7,8v-27,5fh-322,5fd+601,7hd \quad (4.2)$$

Diğer yandan tepki yüzeyi analizi sonucunda elde edilen ve bütün etkileşimli parametrelerin kontur grafikleri Şekil 4.14'te görülebilir.



Şekil 4.14: Kontur Grafikleri (Yığın genişliği için)

4.1.12.2. Yığın yüksekliği ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları

Yığın yüksekliği için yapılan Taguchi analizi sonucunda elde edilen Varyans analiz sonuçları Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: Yığın Yüksekliği için Varyans analizi değerleri

SN Oranı için Varyans Analizi (S2)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
f	2	109,595	109,595	54,797	15,46	0,001
h	1	85,888	85,888	85,888	24,23	0,001
d	1	226,200	226,200	226,200	63,81	0,000
v	1	103,204	103,204	103,204	29,11	0,000
f*h	2	22,511	22,511	11,256	3,18	0,090
f*d	2	38,218	38,218	19,109	5,39	0,029
f*v	2	2,861	2,861	1,430	0,40	0,679
h*d	1	25,682	25,682	25,682	7,24	0,025
h*v	1	6,587	6,587	6,587	1,86	0,206
d*v	1	0,969	0,969	0,969	0,27	0,614
Residual Error	9	31,905	31,905	3,545		
Total	23	653,621				

Elde edilen Varyans analizi tablosu incelendiğinde yığın genişliği analizine benzer bir sonucun oluştuğu görülmektedir. Etkileşimli faktörlere bakıldığında odak

uzaklığı-boşluk faktörünün P değeri 0.09 çıkmıştır, bu yüzden sonuca önemli bir etkisinin olmadığı kabul edilebilir.

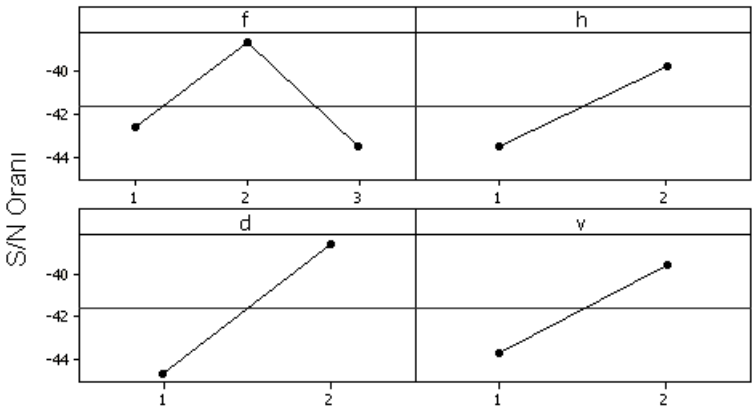
Taguchi analizi sonucunda Tablo 4.12'de görülen tepki tablosu elde edilmiştir.

Tablo 4.12: Tepki Tablosu (Yığın Yüksekliği için)

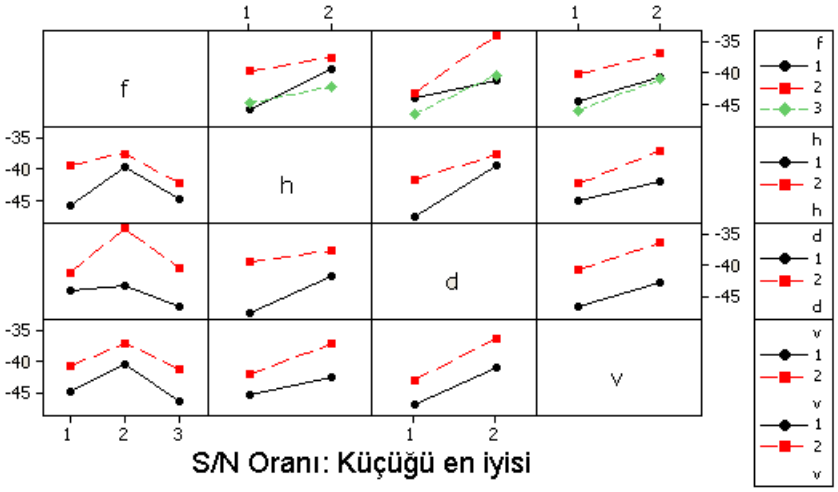
SN Oranı için tepki tablosu (Küçüğü en iyisi)

Level	f	h	d	v
1	-42,64	-43,51	-44,69	-43,69
2	-38,64	-39,72	-38,55	-39,54
3	-43,56			
Delta	4,92	3,78	6,14	4,15
Rank	2	4	1	3

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da faktörlerin tek olarak ve birbirleri ile etkileşimli olarak yığın yüksekliği sonucuna etkileri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Faktörlerin yığın yüksekliğine direkt etkileri



Şekil 4.16: Faktörlerin yığın yüksekliğine etkileşimli etkileri

Yine tepki tablolarına ve grafiklere göre tercih edilecek seviyeler Tablo 4.13'teki şekilde çıkmaktadır.

Tablo 4.13: Tercih seviyeleri (Yığın yüksekliği için)

Tablo	Odak	Boşluk	Debi	İlerleme
S/N oranı	2	2	2	2

Yığın genişliğinden farklı olarak yığın yüksekliğinde minimum boyut elde edebilmek için odak uzaklığının 69.25mm olması gerekmektedir.

Tepki yüzeyi analizi sonucunda ise Tablo 4.14'teki gibi bir Varyans tablosu çıkmaktadır. Buradan anlaşıldığına göre yığın yüksekliği için oluşturulacak regresyon modelinde lineer olmayan bir unsur bulunmaktadır (square için P=0).

Tablo 4.14: Tepki yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Yığın yüksekliği için)

s2 için Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	137899	137899,2	19699,9	26,92	0,000
Linear	4	104734	60075,8	15018,9	20,52	0,000
Square	1	16428	16428,0	16428,0	22,45	0,000
Interaction	2	16737	16737,0	8368,5	11,43	0,001
Residual Error	16	11710	11710,5	731,9		
Total	23	149610				

Önemsiz unsurlar çıkarılarak yapılan regresyon analizi sonucunda Tablo 4.15'te görüldüğü gibi uydurulan modelin datalara uygunluğu %88,75'tir. Burada dikkat edilirse lineer olmayan unsurun odak uzaklığı-odak uzaklığı olduğu görülür. Zaten faktöriyel tasarımda lineer olmayan bir sonuç çıkabilecek durumdaki tek parametre odak uzaklığı parametresidir.

Tablo 4.15: Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Yığın yüksekliği için)

S2 için tahmini regresyon katsayıları

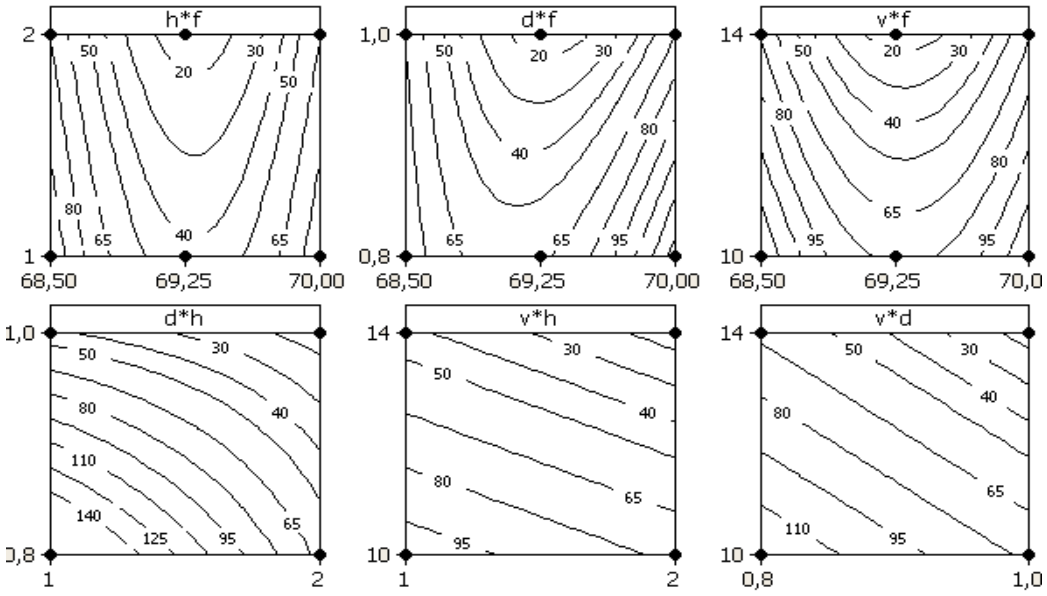
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	459103	100025	4,590	0,000
f	-13442	2886	-4,658	0,000
h	-471	100	-4,711	0,000
d	15037	6247	2,407	0,029
v	-15	3	-5,576	0,000
f*f	99	21	4,738	0,000
f*d	-233	90	-2,587	0,020
h*d	444	110	4,022	0,001

S = 27,0537 R-Sq(adj) = 88,75%

Bu sonuçlara göre yığın yüksekliği sonuçları yapılan regresyon sonucunda belirtilen hata payı içerisinde oluşturulan model şu şekildedir.

$$s2=459103 - 13442f - 471h + 15037d - 15v + 99f^2 - 233fd + 444hd \quad (4.3)$$

Tepki yüzeyi analizi sonucunda yığın yüksekliğine ait kontur grafikleri Şekil 4.17'deki şekilde oluşmaktadır.



Şekil 4.17: Kontur Grafikleri (Yığın yüksekliği için)

4.1.12.3. Ağırlık ile ilgili yapılan analizlerin sonuçları

Taguchi analizi yığın ağırlığı için uygulandığında elde edilen Varyans analizi Tablo 4.16'da görüldüğü şekildedir. Diğer sonuçlarda olduğu gibi hattın ağırlığında da bütün faktörler yüksek etkiye sahiptir. Fakat etkileşimli faktörlerin sonuca etkilerinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Taguchi analizi sonucunda Tablo 4.17'de görülen tepki tablosu, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da görülen grafikler elde edilmiştir. Tepki tablosu incelenecek olursa önemine göre faktörlerin sıralaması (S/N oranına göre) gaz debisi, odak uzaklığı, boşluk ve ilerleme hızı şeklinde olmaktadır.

Tablo 4.16: Yığın Ağırlığı için Varyans analizi değerleri

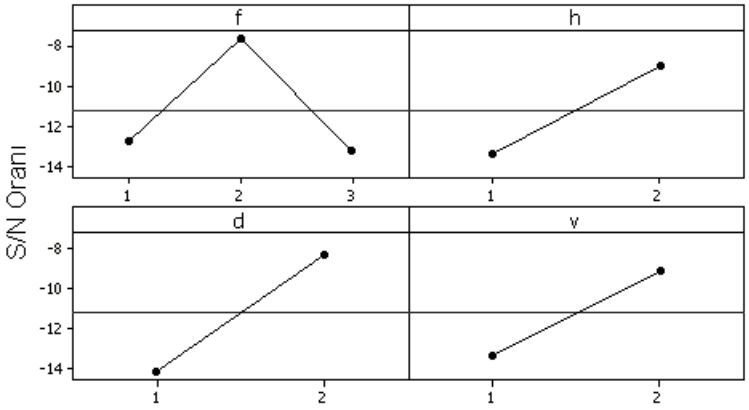
SN oranı için Varyans Analizi(s3)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
f	2	153,844	153,844	76,922	10,86	0,004
h	1	114,954	114,954	114,954	16,23	0,003
d	1	205,542	205,542	205,542	29,02	0,000
v	1	106,040	106,040	106,040	14,97	0,004
f*h	2	18,819	18,819	9,410	1,33	0,312
f*d	2	28,572	28,572	14,286	2,02	0,189
f*v	2	7,448	7,448	3,724	0,53	0,608
h*d	1	29,582	29,582	29,582	4,18	0,071
h*v	1	0,050	0,050	0,050	0,01	0,935
d*v	1	0,001	0,001	0,001	0,00	0,991
Residual Error	9	63,749	63,749	7,083		
Total	23	728,600				

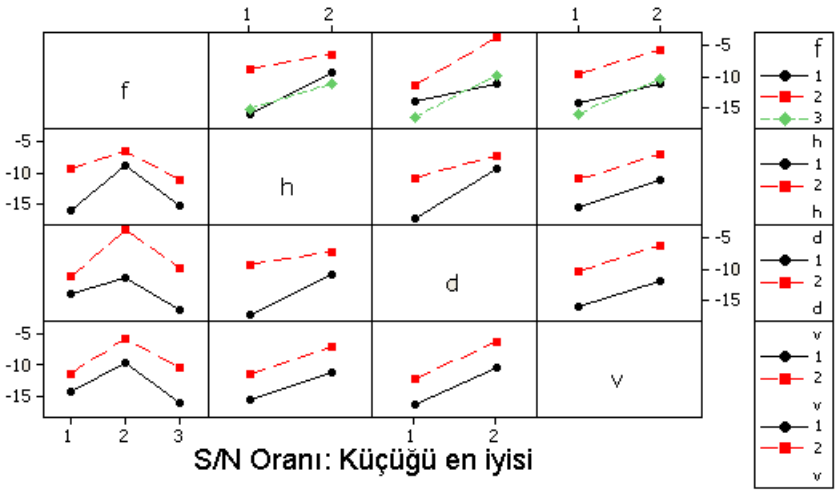
Tablo 4.17: Tepki Tablosu (Ağırlık için)

SN Oranı için Tepki Tablosu (Küçüğü en iyisi)

Level	f	h	d	v
1	-12,749	-13,396	-14,134	-13,310
2	-7,638	-9,019	-8,281	-9,106
3	-13,236			
Delta	5,598	4,377	5,853	4,204
Rank	2	3	1	4



Şekil 4.18: Faktörlerin yığın ağırlığına direkt etkileri



Şekil 4.19: Faktörlerin yığın ağırlığına etkileşimli etkileri

Analiz sonucunda elde edilen şekillere göre faktörler için tercih edilecek seviyeler yığın yüksekliğinde olduğu gibi aşağıdaki şekilde çıkmaktadır.

Tablo 4.18: Tercih seviyeleri (ağırlık için)

Tablo	Odak	Boşluk	Debi	İlerleme
S/N oranı	2	2	2	2

Tablo 4.19'da Tepki yüzeyi analizi sonucu elde edilen Varyans analizi tablosu görülmektedir. Yine yığın yüksekliğinde olduğu gibi ağırlık için de elde edilecek modelde lineer olmayan bir unsur bulunmaktadır.

Tablo 4.19: Tepki Yüzeyi – Varyans analizi sonucu (Ağırlık için)

S3 için Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	161,755	161,7550	26,9592	11,78	0,000
Linear	4	121,846	94,1194	23,5299	10,29	0,000
Square	1	26,107	26,1075	26,1075	11,41	0,004
Interaction	1	13,802	13,8017	13,8017	6,03	0,025
Residual Error	17	38,890	38,8900	2,2876		
Total	23	200,645				

Önemli olarak belirtilen faktörlerin kullanılması ile gerçekleştirilen regresyon analizi sonucuna göre modelin datalara uygunluğu %73,78 olarak çıkmıştır.

Tablo 4.20: Uydurulan modele göre elde edilen katsayılar (Ağırlık için)

S3 için tahmini regresyon katsayıları

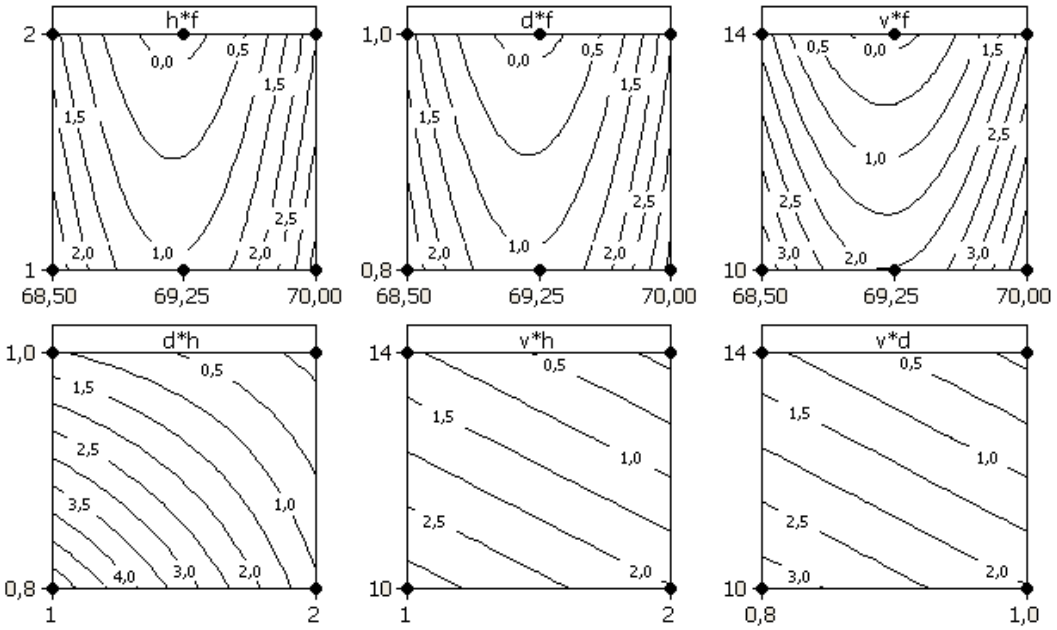
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18878,0	5583,25	3,381	0,004
f	-544,3	161,26	-3,375	0,004
h	-16,4	5,59	-2,933	0,009
d	-36,7	9,76	-3,756	0,002
v	-0,5	0,15	-3,509	0,003
f*f	3,9	1,16	3,378	0,004
h*d	15,2	6,17	2,456	0,025

S = 1,51250 R-Sq(adj) = 73,78%

Bu sonuçlara göre yığın ağırlığı sonuçları yapılan regresyon sonucunda belirtilen hata payı içerisinde oluşturulan model şu şekildedir.

$$s3=18878 - 544,3f - 16,4h - 36,7d - 0,5v + 3,9f^2 + 15,2hd \quad (4.4)$$

Tepki yüzeyi analizi sonucunda kontur grafikleri ise Şekil 4.20'deki gibi oluşmaktadır.



Şekil 4.20: Kontur Grafikleri (Ağırlık için)

4.1.13. Sonuçların değerlendirilmesi

4.1.13.1. Tepki değerleri bakımından sonuçların tartışılması ve irdelenmesi

Genişlik:

Taguchi analizine göre genişliği en çok gaz debisi ve boşluk ana faktörleri ve gaz debisi-boşluk etkileşimli faktörü etkilemektedir. Daha sonra ilerleme hızı ve odak yüksekliği faktörü ve odak uzaklığı-boşluk ve odak uzaklığı-gaz debisi faktörü etkilemektedir.

Hızla ilgili hiçbir etkileşimli faktörünün etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

Etkileyen faktörlerin önem sırası şu şekildedir; gaz debisi, boşluk, ilerleme hızı ve odak uzaklığı. Amaç fonksiyonu sağlayan kombinasyon ise odak faktörünün birinci, diğerlerinin ise ikinci seviyesi ile oluşan kombinasyondur.

Tepki yüzeyine göre olayın lineer olduğu, lineer olmayan bir durumun söz konusu olmadığı anlaşılmaktadır. Buna göre sonucu etkileyen faktörlerden oluşan lineer bir model oluşturulmuştur.

Şekil 4.14-d-h grafiğine göre boşluğun ve debinin artması ile yığın genişliğinin azaldığı görülmektedir. Bu her iki parametre için de beklenen bir durumdur. Debinin artması ile toz hızı da artacaktır. Debinin ve boşluğun artması ile toz hızlarının arttığı yapılan hızlı kamera kayıtlarında gözlenmiştir.

Tablo 4.5'te yapılan hesaplama sonuçları da bu durumu doğrulamaktadır. Toz hızının artması ile lazerle etkileşime giren tozların etkileşim zamanları düşük oldukları için etkileşime giren tozların lazer enerjisini soğurarak erimesi oranı düşük olmaktadır.

Şekil 4.14-h-f ve d-f grafiğine göre ise odak uzaklığının artması ile debi ve boşluktaki artışlar sonucunda yığın genişliğinin beklendiği gibi küçük olacağı anlaşılmaktadır. Fakat odak uzaklığının azalması ile debi ve boşluğun azalmasıyla yine genişlikte bir azalmanın söz konusu olduğu görülüyor. Bu durum boşluk ve gaz debisi faktörleri bakımından beklenmeyen bir durumdur. Bu yüzden bu durumda etkin belirleyici faktörün odak uzaklığı olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.14-v-f, v-h ve v-d grafiklerinden görüldüğü gibi ilerleme hızının artması ile lazerin altlık malzeme üzerindeki etki miktarı azalacağından ve lazerle etkileşime giren toz miktarında azalma olacağından dolayı yığın genişliği azalmaktadır.

Yükseklik:

Taguchi Varyans analizine göre değişken faktör olarak belirtilen bütün ana faktörlerin yığın yüksekliğine direkt etkileri olduğu görülmektedir.

İlerleme, gaz debisi ve nozul boşluğu faktörlerinin yığın genişliğinde olduğu gibi benzer yapıda bir etki ile yığın yüksekliğini etkileyeceği açıktır.

Odak uzaklığında yaşanan etki ise odak uzaklığının değişimi ile spot büyüklüğünde gerçekleşen büyüklük farkı ile tanımlanabilir. Minimum spot çapına sahip olunan seviyede işlem yapıldığında minimum yığın yüksekliği elde edilirken, büyük spot çapına sahip olan yüksekliklerde yığın oluşturulduğunda daha büyük yığın yükseklikleri elde edilmiştir.

Tepki yüzeyi Varyans analizinde de açıkça görüldüğü gibi uydurulan modelde lineer olmayan bir unsur vardır ve modelde de görüldüğü gibi bu unsur odak uzaklığıdır. Odak uzaklığı orta değere yani gerçek odak uzaklığına yaklaştıkça yığın yüksekliği azalmakta, uç noktalara yaklaştıkça ise yükseklik artmaktadır, (Şekil 4.17-h-f, v-f ve d-f).

Şekil 4.17-d-h grafiğinden anlaşıldığı gibi boşluk ve gaz debisinin artması yığın genişliğinde olduğu gibi yüksekliğinin de azalmasına yol açmaktadır.

Yine Şekil 4.17-v-h ve v-d grafiklerinden de ilerleme hızının artması ile yığın yüksekliğinin de azaldığı net bir şekilde görülmektedir.

Ağırlık:

Yığın genişliği ve yüksekliğine bağlı olarak ağırlık da benzer davranış gösterecektir. Bu yüzden ağırlığın gözlemlenmesi gereksiz olarak görülebilir. Fakat yığın genişliği ile yığın yüksekliği parametreleri boyutsal ölçümlerdir ve oluşturulan yığın geometrileri çok düzgün olmadığı için elde edilen ölçümler ortalama ölçümlerdir. Bu anlamda ağırlık analizi genişlik ve yükseklikte yapılan işlemlerin ve ölçümlerin de sağlaması anlamına gelmektedir.

Yapılan ölçümlerde düzensizliklerden kaynaklanan girintilerin ne oranda ölçüye yansıtılmış olduğu ağırlık analizi ile diğer analizlerin karşılaştırması yapılarak ortaya konulabilir.

Taguchi varyans analizi incelendiğinde yığın genişliği ve yüksekliğinde olduğu gibi ağırlık da bütün ana faktörlerden etkilenmektedir. Fakat diğerlerinde olduğundan farklı olarak ağırlık üzerinde hiçbir etkileşimli faktörün önemi yoktur.

İsteğe göre en iyi sonucu genişlikten farklı olarak yükseklik değerinde olduğu gibi bütün değerlerin ikinci seviyelerinin vereceği görülmektedir.

Tepki yüzeyi Varyans analizine bakılacak olursa yığın yüksekliğinde olduğu gibi odak uzaklığının prosese etkisi lineer olmayan bir yapıdadır. Bu durum göz önünde bulundurularak elde edilen modelde de odak uzaklığının eksponensiyal olarak bir etkisinin olduğu ve ayrıca boşluk- gaz debisi etkileşimli faktörünün de ağırlığa etkisinin olduğu görülmektedir. Bu etkinin Taguchi Varyans analizinde çıkmamış olması ise lineer bir model oluşturulduğundandır.

Tepki yüzeyi kontur grafikleri incelendiğinde yığın yüksekliği ile hemen hemen aynı etkinin gözlendiği söylenebilir.

4.1.13.2. Ana faktörler bakımından sonuçların tartışılması ve irdelenmesi

Odak uzaklığının etkisi:

Yapılan deneylerde odak uzaklığı Şekil 4.2'den de şekilsel olarak görüldüğü gibi üç farklı konumu ile kullanılmıştır. Daha önce de açıklandığı gibi odak uzaklığının lazer proses işlemine etkisi oluşan minimum spot büyüklüğünü tayin etmesinden kaynaklanmaktadır. Spot büyüklüğünün minimum olduğu seviyede lazer enerji yoğunluğunun maksimum değerde olmasından dolayı direkt olarak Şekil 4.2-c ve d kombinasyonlarının kullanılması gerektiği düşünülebilir. Fakat lazer ışını altlık malzemeye etki etmesinin yanı sıra odak bölgesine beslenen toz malzemeye de etki etmektedir. İşlem sonucunda oluşan yapının oluşumunda altlık malzemeden çok toz malzeme ile lazerin yaptığı etkileşimin daha önemli olduğu söylenebilir. Şekil 4.2'deki şekillerde bulunan oklar tozların püskürtülmesi ile izledikleri yolu göstermektedir. Buradan yola çıkılacak olursa tozların lazerle etkileşimi sadece tek

bir seviyede olmayıp belirli bir yüksekliği kapsayan bir hacim içerisinde gerçekleşmektedir. Sadece altlık üzerine markalama işlemine benzer bir işlem yapılsa idi odak uzaklığının Şekil 4.2-a ve e'deki konumları dikkate alındığında lazer ışını her iki eksende de ideal Gauss profiline sahip olması şartı ile alınacak sonuçların birbirleri ile yakınlık göstereceği beklenmeliydi. Fakat toz yığma işlemindeki hacimsel etkileşim durumu söz konusu olduğundan dolayı lazer ışını odak uzaklığının bütün konumlarında farklı sonuçların ortaya çıkması beklenmelidir.

Nitekim elde edilen numuneler incelendiğinde bu yönde sonuçların alındığı görülmüştür. Örneğin Tablo 4.4'ten boşluk, gaz debisi ve ilerleme hızlarının aynı olduğu odak uzaklıklarının 3 farklı değeri aldığı 1, 9 ve 17 nolu deneylerin sonuçlarına bakılacak olursa minimum spot değeri veren ikinci seviyede (9 nolu numune) minimum yığın genişliği elde edilmiştir. Bunun yanı sıra birinci seviye odak uzaklığına sahip olan 1 nolu numunede daha büyük çıkmasına rağmen yine de 9 nolu numuneye yakın bir değer çıkmıştır. 17 nolu numunede ise karşılaştırma yapılamayacak oranda büyük çıkmıştır. Aynı şekilde aynı numunelere ait yığın yüksekliği ve ağırlık sonuçlarında da benzer bir durum oluşmuştur.

Bu durum çoğunlukla diğer karşılaştırmalı sonuçlarda da gözlenmektedir. Özellikle yığın yüksekliğinde bu etkinin çok sayıda numunede aynı şekilde olduğu görülmektedir. Çok az sayıda numunede ise farklı sonuçlar gözlemlenmiştir. Bunlardan en önemlilerine örnek olarak 3,11 ve 19 nolu deneyler ve 4,12 ve 20 nolu deneyler gösterilebilir. Bu deneylerde özellikle gaz debisinin yüksek olduğu görülmektedir. Bunda da esasında tozların hızı ile odak uzaklığının bağlantılı bir ilişkisi bulunmaktadır. Şekil 4.2-a ve e incelenecek olursa lazer ışın huzmesi ile etkileşime giren toz miktarı *a* seçeneğinde daha fazla olacaktır. Bu etki sadece yığın yüksekliği sonucunda bu şekildedir. Yığın genişliğinde yükseklikteki kadar keskin bir ilişki olmamasının nedeni altlık malzemesi üzerinde oluşan eriyiğin toz bulutundan dolayı lazer ışını engellemesi ile sınırlı ölçülerde kalması olarak yorumlanabilir.

Boşluğun etkisi:

Nozul altlık arasındaki boşluk miktarının yığma prosesi ile ilişkisi incelenirken lazersiz toz besleme işleminin hızlı kayıt kamerası ile elde edilen görüntülerinden de yararlanılmıştır.

Daha önce de belirtildiği üzere boşluk miktarının azalması ile lazerin etkili olduğu kısımda fazla toz birikmesi olgusu hızlı kayıt kamera görüntüleri ile tespit edilmişti. Bunun sonucu olarak da elde edilen numunelerin incelemesi sonucu genel olarak boşluk miktarı arttıkça dolgu genişliği ve dolgu yüksekliği değerleri ve bunlara bağlı olarak ağırlık değerleri azalmıştır.

Bu yoruma uymayan bazı sonuçlar da alınmıştır. Bunlardan en önemlisi ise yığın genişliği için 3 ve 7 nolu numuneler ve yığın yüksekliği için ise 11 ve 15 nolu numunelerdir. Boşluk mesafesi arttıkça genişliğin büyük oluştuğu 3 ve 7 nolu deneyleri sırasıyla 1 ve 5 nolu deneylerle karşılaştırdığımızda değişken durumundaki gaz debisinden kaynaklandığı görülmektedir. Aynı şekilde yığın yüksekliğinde benzer etkiyi gösteren 11 ve 15 nolu deneyler de sırasıyla 9 ve 13 nolu deneylerle kıyaslandığında gaz debisi değişiminden kaynaklandığı sonucu çıkmaktadır. Yani boşluğun azalması ile içeriye hapsolan toz miktarının debinin artması ile azalmakta olduğu anlaşılmaktadır. 3 ve 7 nolu deneylerin odak uzaklığının ilk konumunda yani Şekil 4.2-a ve b kombinasyonlarında, 11 ve 15 nolu deneyler ise Şekil 4.2-c ve d kombinasyonlarında gerçekleştiği dikkat çekicidir. Bu konuda da lazer ışın huzme hacmine giren toz miktarı ile ilişkili olduğu görülmekle birlikte hemen bütün debi değişimlerinin olduğu deney kombinasyonlarında bu kadar keskin bir durum olmasa bile benzer bir etki olduğu Tablo 4.4 incelendiğinde görülebilmektedir.

Gaz debisinin etkisi:

Taşıyıcı gaz olarak kullanılan gazın debisi toz partiküllerinin hızını belirleyen en önemli etkendir. Gazın debisi arttıkça toz hızının da artacağı bir gerçektir. Toz hızının artması ile lazer huzmesine girerek etkileşime giren tozların etkileşim süresi

azalmaktadır. Toz hızının artması ile tozun ihtiyaç duyduğu lazer gücü artmaktadır. Dolayısıyla genel olarak gaz debisinin azalması ile daha fazla toz yığılmış olacak, gaz debisinin artırılması sonucunda ise daha az miktarda toz yığılmış olacaktır.

Numuneler incelendiğinde genel olarak bu durumu yansıtmaktadır. Fakat özellikle yığın genişliğinde 5 ve 7 nolu deneylerde ilginç bir şekilde bu durumun tersi bir etki görülmüştür. Fakat yığın yüksekliği değerlerinde çok aykırı bir durum gözlenmemiştir. Bu iki sonucun bir sağlaması olduğu daha önce de belirtilen ağırlık sonucuna bakıldığında yığın genişliğindeki sonucun genele yayılamayacak bir sonuç olduğu, debinin artması ile toz hızının artacağı ve daha az miktarda yığma işleminin gerçekleşeceği açıkça görülmektedir.

5 ve 7 nolu deneylerdeki kadar olmasa da ilk yorumu doğrulayacak bir sonuç alınmayan 6 ve 8 nolu deneyler ile 13 ve 15 nolu deneylerin bulunduğu kombinasyon incelendiğinde bütün bu deneylerin boşluk değerinin fazla olduğu deneyler olduğu görülmektedir. Yani debinin artması dolayısıyla toz hızının artması sonucu ile birebir etkileşimli parametre olan gazın çıkış kesitinin debi değişiminin daha fazla hissedildiği düşük boşluk miktarında toz hızının artışı önemli miktarda değişmektedir.

İlerleme hızının etkisi:

İlerleme hızı lazer ışını ile malzeme arasındaki etkileşim zamanını tayin eder. Dolayısıyla düşük ilerleme hızlarında lazer-malzeme etkileşim zamanı yüksek olduğu için malzeme lazer enerjisini daha fazla soğuracaktır. Bu da lazerli yığma işleminde daha fazla toz yığılması sonucunu doğurmaktadır. İlerleme hızı arttıkça ise lazer-malzeme etkileşim zamanı azalacağından daha az yığma işlemi gerçekleşecektir.

Bu genel kabule göre incelenen bütün numunelerde beklenen sonuçlar alınmıştır.

Diğer yandan ilerleme hızının yavaş veya hızılı olması ile lazer spot büyüklüğünün sahip olduğu ölçü arasında bir ilişki söz konusudur. Şekil 4.2-c ve d'de de lazerin parçaya temas ettiği konumda oluşan odak uzaklığı gerçek odak uzaklığıdır ve bu uzaklıkta lazer ışını mevcut optik-mekanik donanım ile minimum spot büyüklüğüne sahiptir. Bu seviyenin haricindeki a,b,e ve f'de oluşan spot büyüklüğü ise daha büyük olmaktadır. Tablo 4.4'teki sonuçlar üzerinde yapılan inceleme sonucunda genel olarak yüksek ilerleme hızı ile oluşturulan yığınlarda minimum spot seviyesinde oluşturulan yığınlar daha büyük spot seviyelerinde oluşturulan yığınlardan daha geniş olmaktadır. Düşük ilerleme hızı ile oluşturulan yığınlarda ise minimum spot seviyesinde oluşturulan yığınlar daha büyük spot seviyelerinde oluşturulan yığınlardan daha küçük olmaktadır. Bu durumun ışın yoğunluğunun Gauss dağılım formuna yakın bir formda etki göstermesinden kaynaklandığı söylenebilir. Yüksek ilerleme hızında lazer spot çapının büyüyerek yoğunluğun büyük bir kısmının merkezden kenarlara kayması ile enerji yoğunluğunun zayıflamasına neden olduğu, bu da özellikle spotun kenar kısımlarına denk gelen tozların erimesi için yeterli yoğunluğun elde edilememesine neden olduğu anlaşılmaktadır [105]. Diğer yandan düşük ilerleme hızında ise büyük spota sahip lazer ışınının kenar kısımlarının sahip olduğu enerji yoğunluğunun malzemenin erimesi için yeterli düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Denklem (2.9)'dan da anlaşılacağına göre enerji yoğunluğunun artması için lazer gücünün artırılması veya spot büyüklüğünün ve ilerleme miktarının azaltılması gerekmektedir.

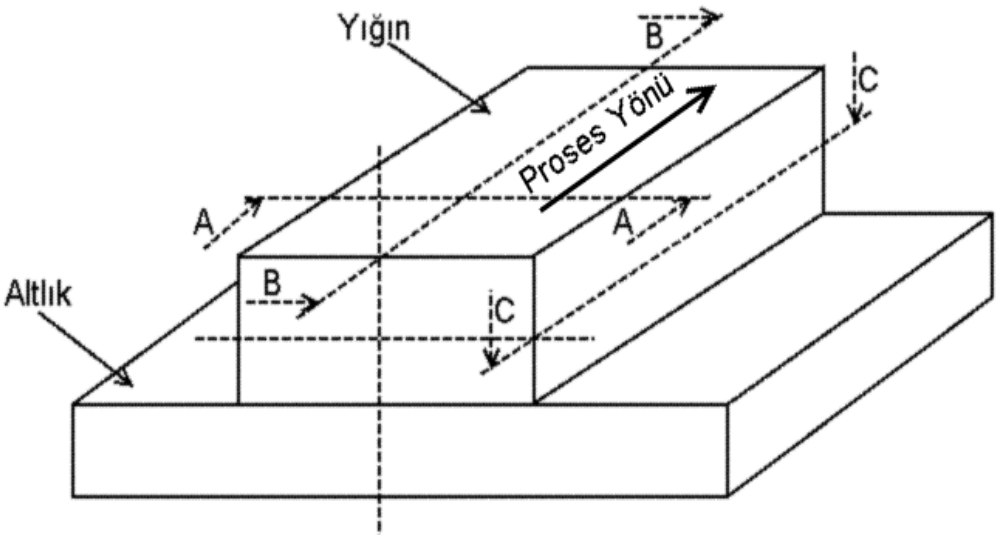
4.2. Tek Bir Yığın Hattının Metalografik Olarak İncelenmesi

4.2.1. Numune hazırlama ve mikroyapı gözlemi

Lazerin bir noktadan diğer bir noktaya ilerlemesi ile tek bir işlemde elde edilen tek kademe ve tek sıralı yığının katılaşmasının ve katılaşması esnasında oluşan mikroyapısının anlaşılabilmesi için farklı özelliklerde imal edilen bazı numuneler Şekil 4.21'de görüldüğü gibi çeşitli kesitleri alınarak mikroskop altında incelenmiştir.

Katılaşma esnasında oluşan tane yapısı şekli ve büyüklüğü lazerle uygulanmış olan enerji miktarı ile ilişkilidir. Katı durumdaki toz ve altlık parçasının eriyik oluşturmak için gereken enerji miktarından daha fazla enerjiye maruz kalması o bölgenin ve ısıdan etkilenmiş bölgenin sıcaklığının daha fazla artmasına neden olacak, bundan dolayı katılaşma esnasında soğuma hızının da daha yavaş olmasına neden olacaktır.

İlerleme hızındaki değişim yığın oluşturma esnasında uygulanan enerji miktarında farklılık oluşturan bir parametredir. Bu farklılığın incelenebilmesi için Bölüm 4.1'de yapılan deneylerde elde edilen 7 ve 8 deney numaralı numuneler seçilmiştir. 7 ve 8 deney numaralı numunelerin oluşturulması esnasında sırası ile 10mm/sn ve 14mm/sn olan ilerleme hızlarının haricinde kullanılan bütün işlem parametreleri aynıdır.



Şekil 4.21: Tek bir yığının mikroyapısının incelenmesi için kullanılacak kesitler

A-A kesiti, yığının oluşturulma yönüne dik düzlemde yığını kesen bir seviyeden alınan kesittir.

B-B kesiti, yığının oluşturulma yönüne ve yığını oluşturan lazer ışınının eksenine paralel doğrultuda yığının tam merkezinden geçen seviyeden alınan kesittir.

C-C kesiti ise yığının oluşturulma yönüne paralel, yığını oluşturan lazer ışınının eksenini dik doğrultuda yığını belli bir seviyeden kesecek şekilde alınan kesittir.

Numuneler istenilen kesitleri oluşturacak şekilde konumlandırılarak epoksi kalıplarına alınmıştır. Daha sonra sırası ile 80, 320, 600,800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kâğıtları ile zımparalanıp içerisinde yaklaşık 0,5µm büyüklüğünde alümina tozu bulunan su kullanılarak keçe ile parlatılmıştır.

Parlatma işleminden sonra numuneler aşağıda içeriği verilen kimyasal kullanılarak 2-3sn süresince dağlanmıştır.

Saf su (100ml)+HCl (20ml)+$FeCl_3$ (5gr) (4.5)

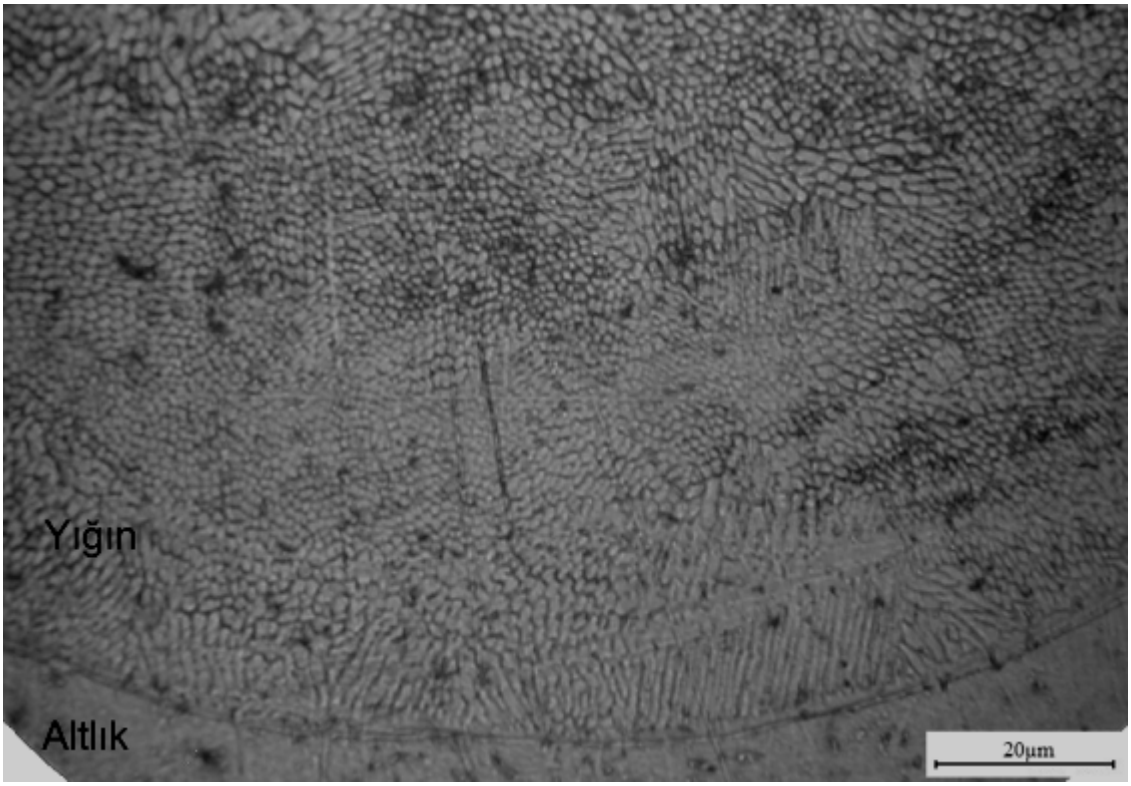
Dağlama sonucunda numuneler çeşitli büyütme oranlarında optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Çeşitli büyütme oranlarında incelenen numunelerden bazı fotoğraflar alınmıştır.

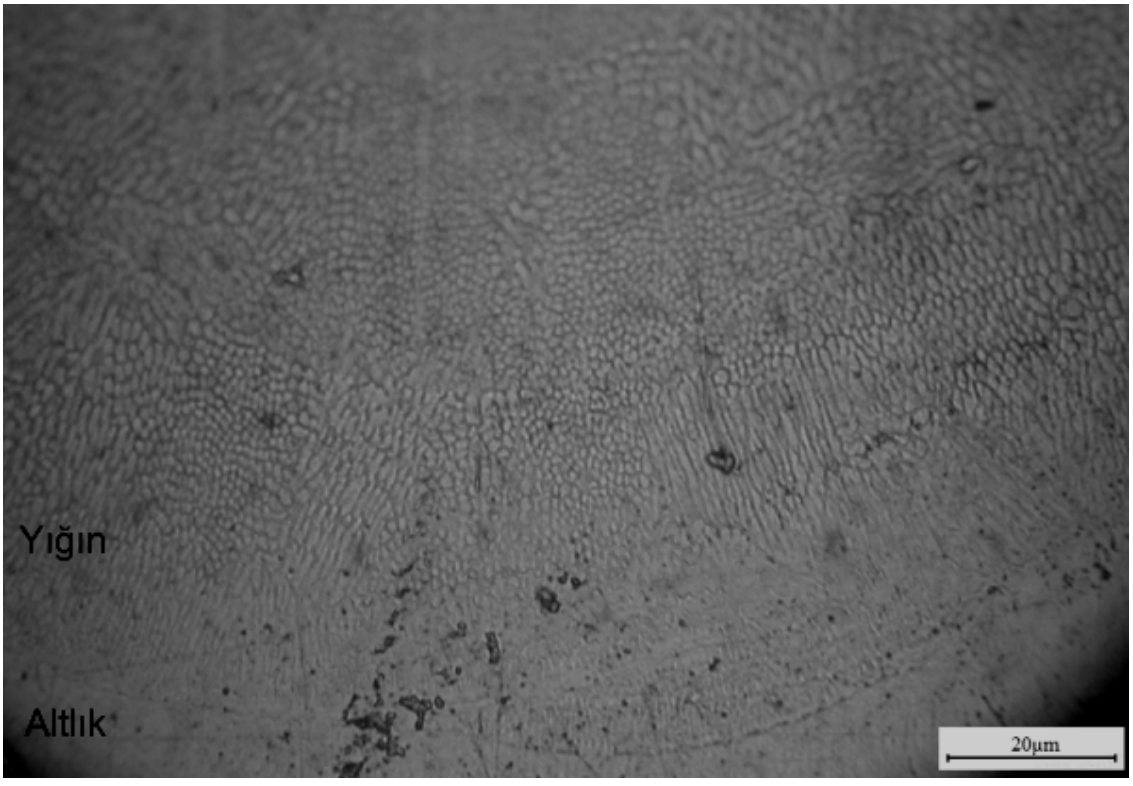
Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te sırasıyla 10mm/sn ve 14mm/sn ilerleme hızları ile elde edilen numunelerde oluşan tanecik oluşumu A-A kesitinden 1000:1 büyütme oranı ile elde edilen görüntülerde gösterilmektedir.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te sırasıyla 10mm/sn ve 14mm/sn ilerleme hızları ile elde edilen numunelerde oluşan tanecik oluşumu B-B kesitinden 500:1 büyütme oranı ile elde edilen görüntülerde gösterilmektedir.

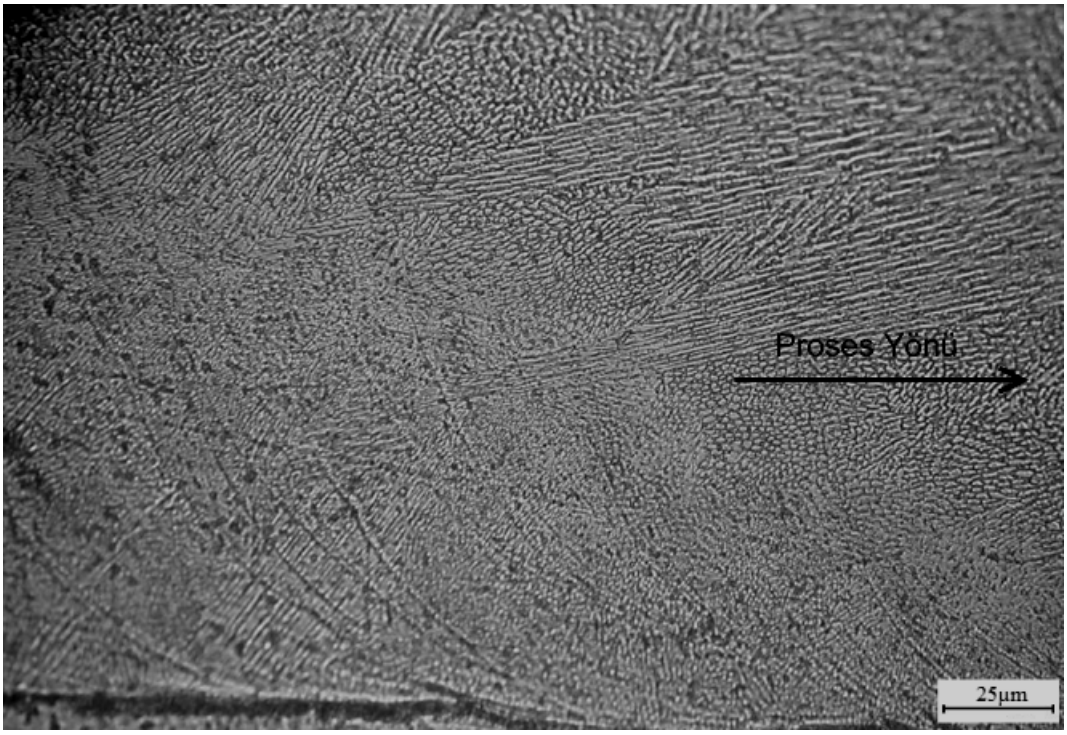
Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de ise sırasıyla 10mm/sn ve 14mm/sn ilerleme hızları ile elde edilen numunelerde oluşan tanecik oluşumu C-C kesitinden 1000:1 büyütme oranı ile elde edilen görüntülerde gösterilmektedir.



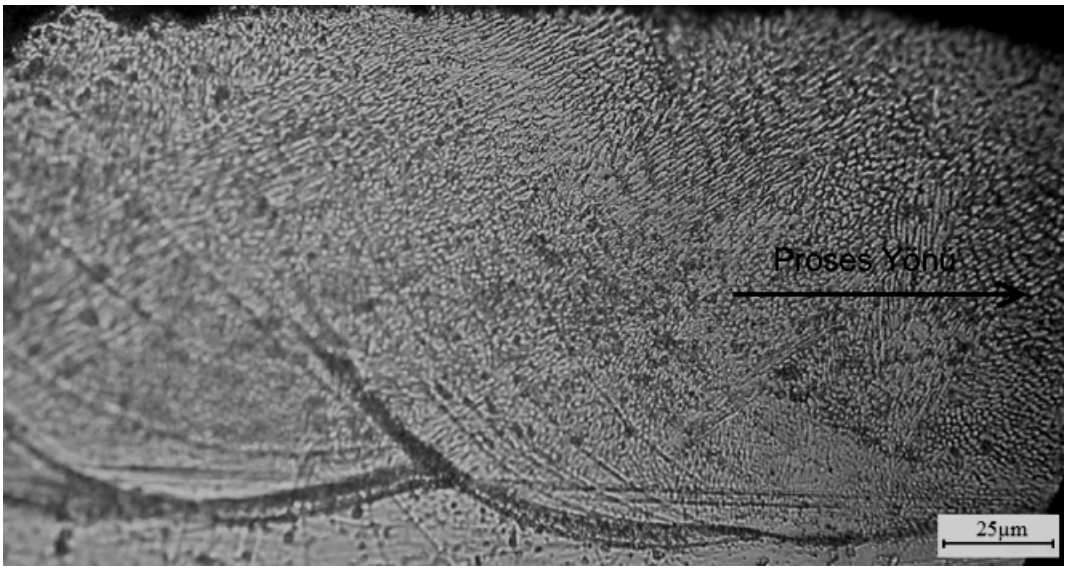
Şekil 4.22: Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-10mm/sn)



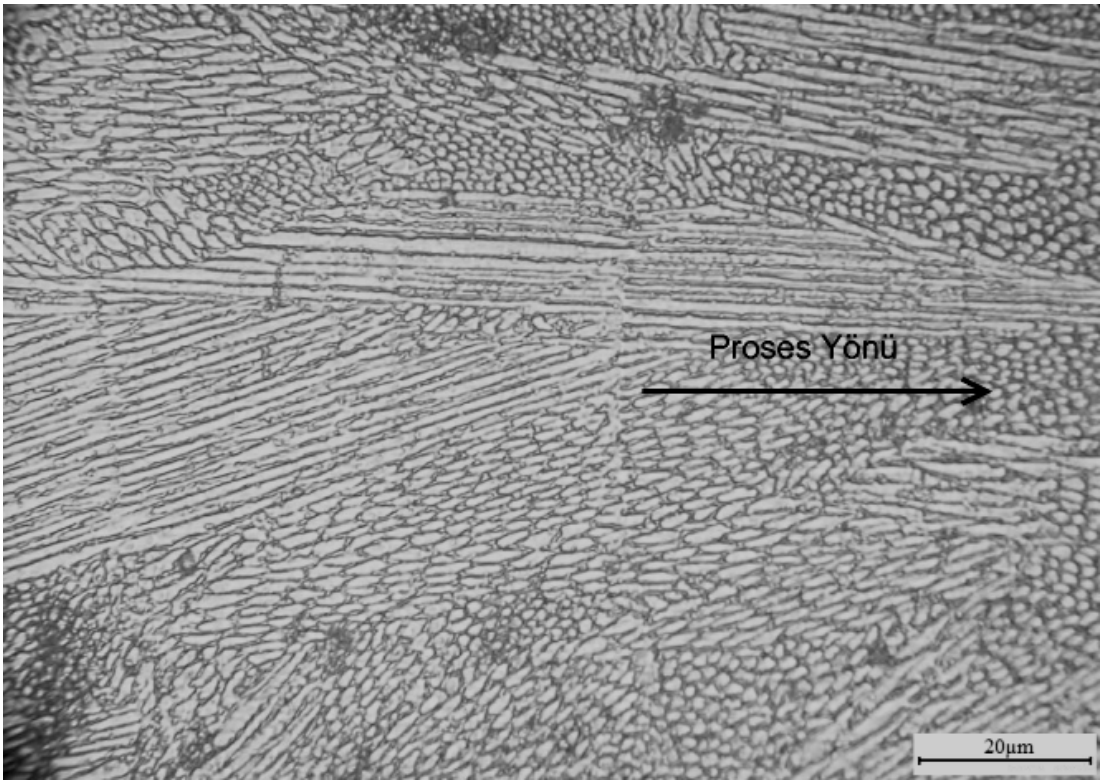
Şekil 4.23: Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-14mm/sn)



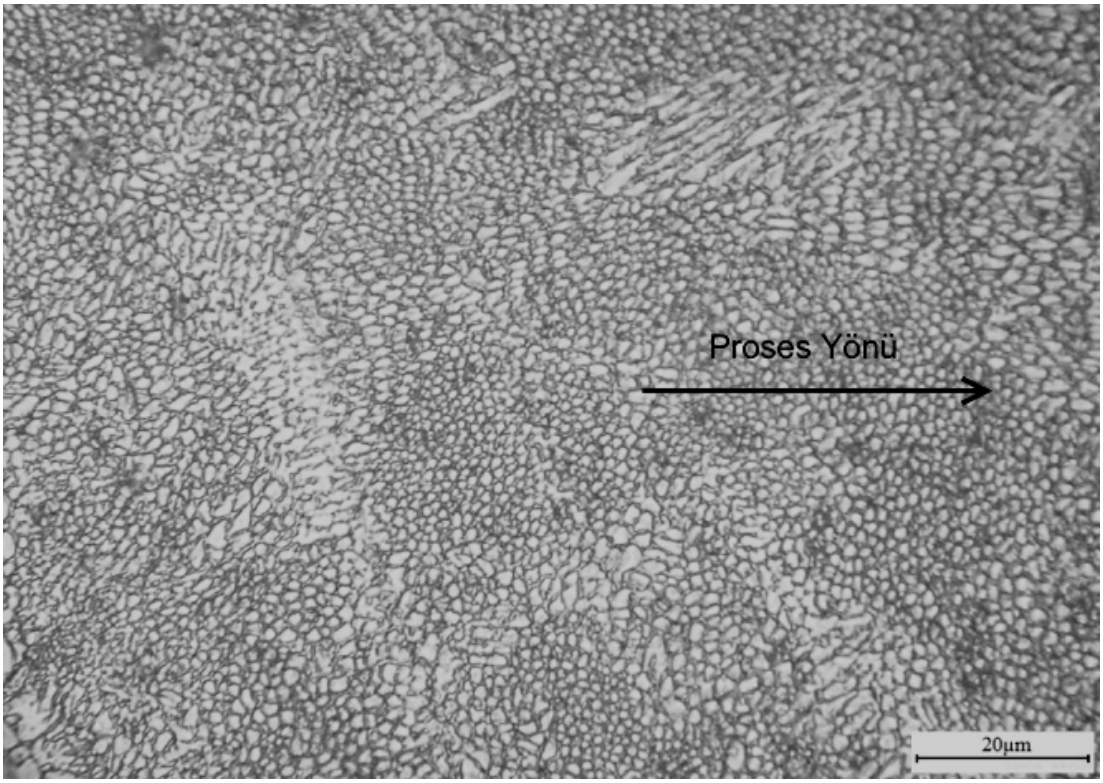
Şekil 4.24: Tanecik oluşumu (B-B Kesiti-10mm/sn)



Şekil 4.25: Tanecik oluşumu (B-B Kesiti-14mm/sn)

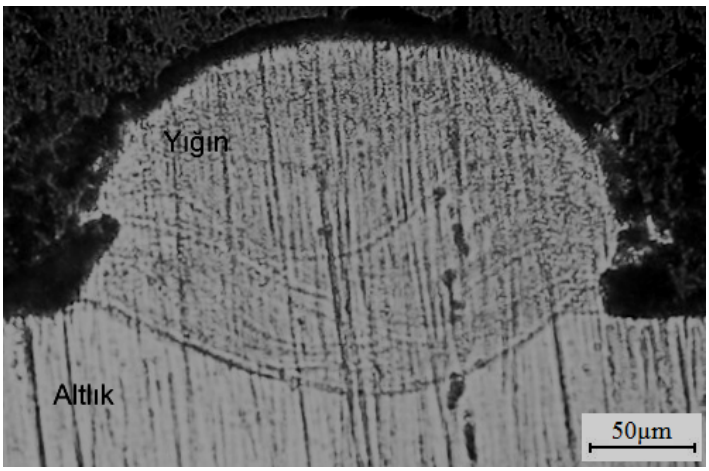


Şekil 4.26: Tanecik oluşumu (C-C Kesiti-10mm/sn)

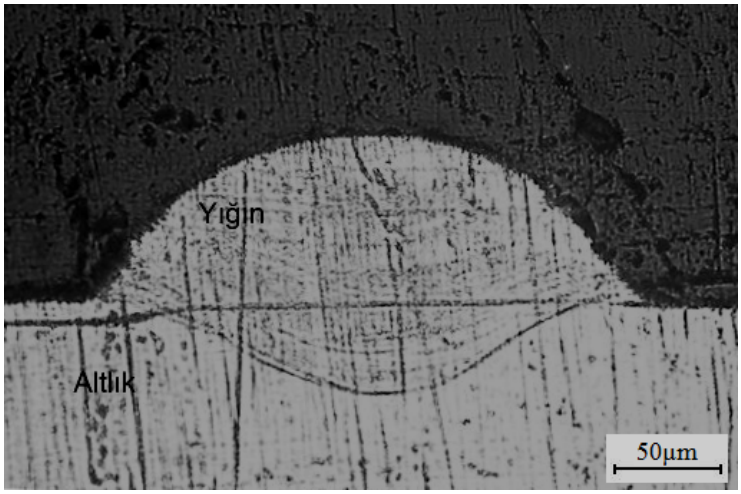


Şekil 4.27: Tanecik oluşumu (C-C Kesiti-14mm/sn)

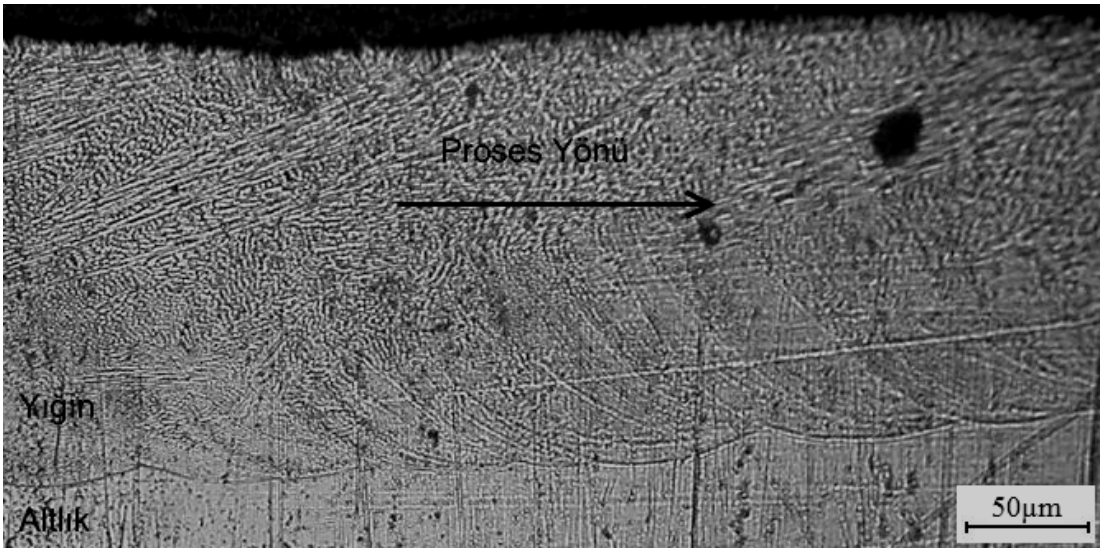
Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 A-A kesitinden, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 B-B kesitinden, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33 ise C-C kesitinden katılaşmanın zamana göre kademeli olarak değişiklik arz ettiğini gösteren ve 200:1 oranı ile büyütülerek alınan görüntülerdir.



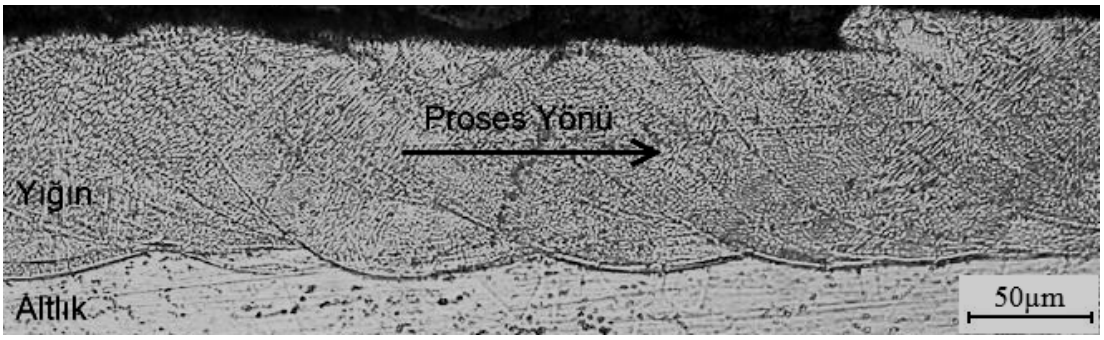
Şekil 4.28: Kademeli katılaşma (A-A Kesiti-10mm/sn)



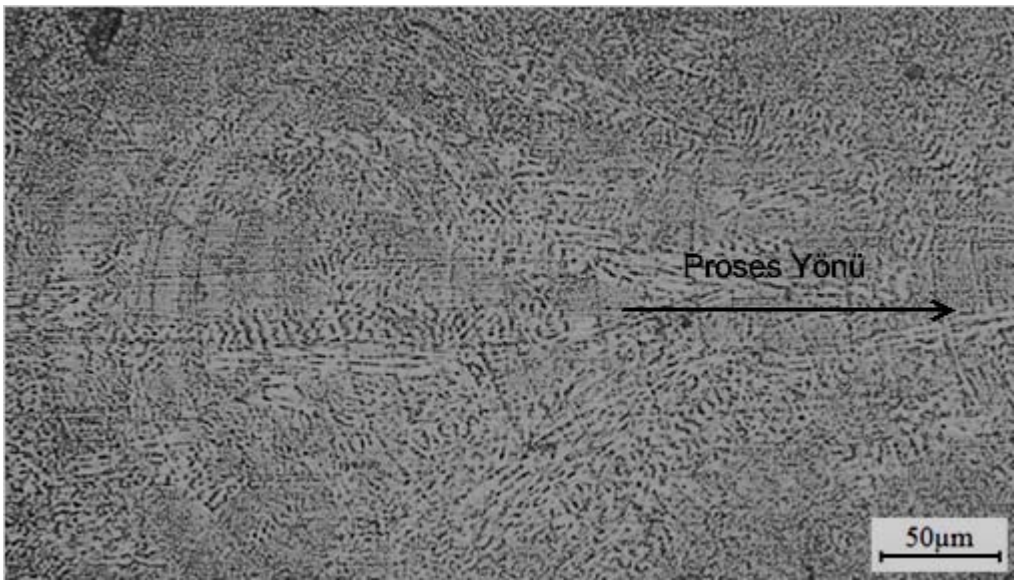
Şekil 4.29: Kademeli katılaşma (A-A Kesiti-14mm/sn)



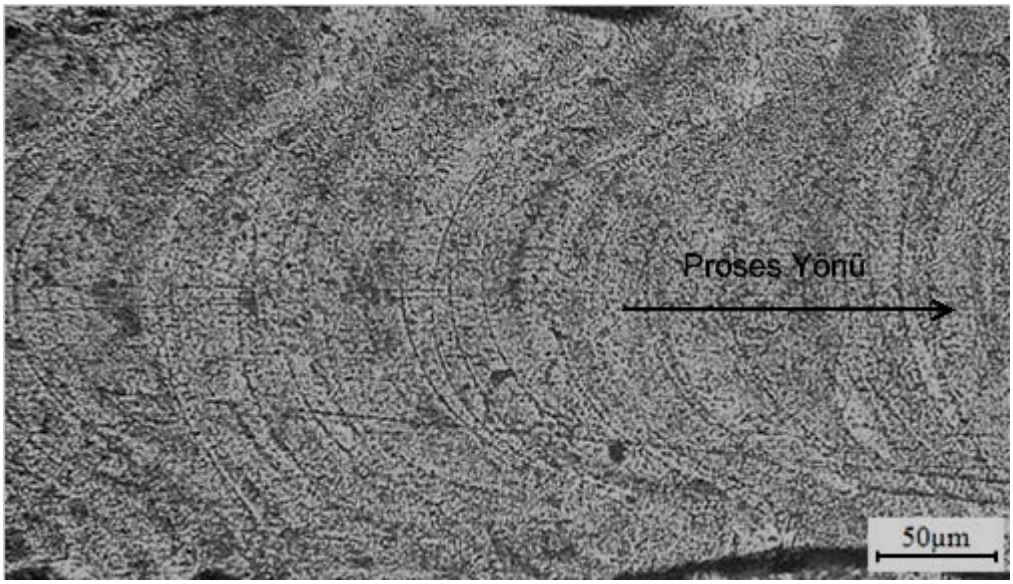
Şekil 4.30: Kademeli katılaşma (B-B Kesiti-10mm/sn)



Şekil 4.31: Kademeli Katılaşma (B-B Kesiti-14mm/sn)



Şekil 4.32: Kademeli Katılaşma (C-C Kesiti-10mm/sn)



Şekil 4.33: Kademeli Katılaşma (C-C Kesiti-14mm/sn)

4.2.2. Sonuçların Değerlendirilmesi

A-A Kesitine ait değerlendirmeler:

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 şekilleri incelendiğinde yığının altlık malzeme ile temas ettiği ara yüzeyde her iki numunede de kolonsal yapıda tanecik oluşumu gözlenmiştir. Bu tanecik yapısı katılaşma esnasında yığının ısı kaybının altlık yönünde oluşmasının bir sonucudur.

Kolonsal yapıda oluşan tanecik büyümesi 10mm/sn ilerleme hızı ile elde edilen numunede (Şekil 4.22) altlık malzemeye yakın olan kısımlarla sınırlı kalmış, diğer kısımlarda eş eksenli tanecik oluşumu gözlenmiştir. 14mm/sn ilerleme hızı ile elde edilen numunede ise (Şekil 4.23) kolonsal yapı diğer numuneye oranla daha büyük bir alanda oluşmuştur. Bu duruma neden olarak ise malzemeye uygulanan enerji miktarının etkisinin olduğu söylenebilir. Yüksek ilerleme hızında, düşük ilerleme hızına nazaran parçaya daha az miktarda enerji girdisi olduğundan dolayı parçanın sıcaklığı daha az olmakta, dolayısıyla soğuma altlığa doğru ısı verişi şeklinde devam edeceğinden dolayı kolonsal yapı oluşumu azalarak da olsa devam etmiştir.

Diğer yandan yine enerji girdisi miktarı ile ilişkili durum ise tane boyutudur. Yüksek miktarda enerji girişi olan malzeme daha geç soğuduğundan dolayı oluşan tane büyüklükleri düşük enerji girişi ile imal edilen parçada oluşan tane büyüklüklerinden daha büyük olmaktadır. Her iki numunede de soğumanın ve katılaşmanın ilk olarak gerçekleştiği altlık malzemeye yakın olan kısımlarda oluşan tane büyüklükleri daha küçük, soğumanın ve katılaşmanın en son gerçekleştiği üst kısımlarda ise daha büyük olmaktadır.

Dağlama neticesinde makro boyutta görülen yığının altlık ile oluşturduğu ara-yüzey çizgisine benzer şekilde oluşmuş olan çizgiler eriyiğin belirli bir zaman sürecinde kademeli olarak altlıktan başlayarak yukarıya doğru katılaştığını göstermektedir. Bu durum 200:1 büyütme ile alınan Şekil 4.28 Şekil 4.29'daki görüntülerde net bir şekilde görülebilmektedir. Tek bir yığma işlemi ile oluşturulan bu yapılarda oluşan bu katılaşma izlerinin yığın-altlık ara-yüzeyindeki duruma benzer çıkmasının nedeni olarak, lazer enerjisinin gauss profiline benzer şekilde etki etmesiyle orta kısmın maruz kaldığı enerji miktarının kenar kısımların maruz kaldığından daha fazla olduğu gösterilebilir. Yüksek enerjiye maruz kalan orta eksen bölgesinin sıcaklığı daha düşük miktarda enerjiye maruz kalan kenar bölgesinin sıcaklığından daha fazla olduğu için katılaşma zamanı da kademeli olarak farklı oluşmuştur.

Özellikle Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 görüntüleri detaylı olarak incelendiğinde tanecik oluşumunda birbirine çok yakın bölgelerde düzensiz bir şekilde eş eksenli ve kolonsal yapıda tane oluşumları, küçük ve büyük boyutlu tanelerin karmaşık bir şekilde oluşumu gibi bir takım düzensizlikler olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin ise lazerli yığma işleminde toz malzemenin sürekli olarak eriyik içerisine beslenmesi neticesinde küçük zaman farklarında lazerin etki alanına giren tozların farklı zamanlarda eriyip katılaşmasından ve farklı boyuttaki tozların farklı zamanlarda eriyip katılaşmasından kaynaklandığı söylenebilir.

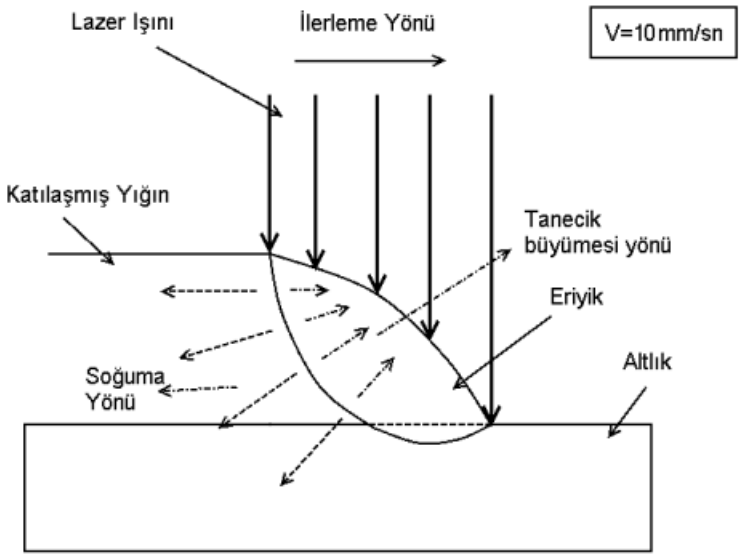
Altlık malzemesi ile toz malzemenin kompozisyonu aynı olduğundan dolayı oluşturulan yığın yapısı ile altlığın yeniden eritilerek katılaşan kısmında oluşan tanecik oluşumu epitaksiyal şeklinde oluşmuştur. Şekil 2.6: 'da temsili olarak

gösterilen yığma malzemesi ile altlık malzemesinin karışarak oluşturduğu yapının (A+B bölgesi) tane yapısı Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te ayrıntılı olarak görülebilir.

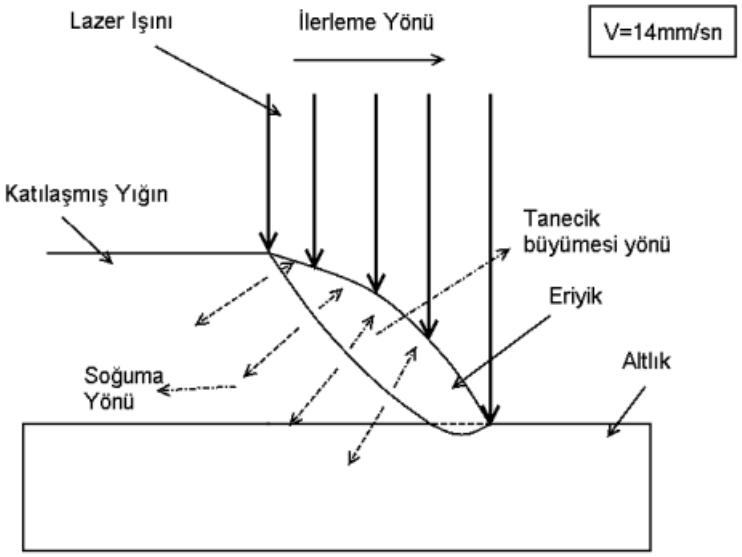
B-B Kesitine ait değerlendirmeler:

B-B kesitinden 500:1 büyütme oranı ile alınan Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 görüntüleri incelendiğinde her iki mikroyapıda da kolonsal tanelerin ağırlıklı olarak bulunduğu görülmektedir.

Kolonsal yapılardaki taneler altlığa yakın bölgelerde altlık yüzeyine daha geniş bir açı oluşturacak şekilde, altlığa uzak bölgelerde ise altlık yüzeyine daha dar açı oluşturacak şekilde proses yönünde oluşmuştur. Tanelerin proses yönünde oluşması soğumanın proses yönü tersi yönünde gerçekleştiğini göstermektedir. Bunun nedeni ise lazerin eriyik üzerinden proses yönünde yapmış olduğu hareket sonucunda eriyiğin katılaşarak lazerin etki etmekte olduğu bir sonraki kısımdaki eriyik için altlık gibi davranması olarak gösterilebilir. Bu durumu temsil eden şekiller düşük ve yüksek ilerleme hızları için sırası ile Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'dir.



Şekil 4.34: Düşük ilerleme hızına ait katılaşma şekli



Şekil 4.35: Yüksek ilerleme hızına ait katılaşma şekli

Gerçek mikroyapı görüntüleri olan Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te ve temsili olarak da Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te görüldüğü gibi düşük ilerleme hızı ile oluşturulan yapıda oluşan kolonsal tanelerin yatayla yapmış oldukları açı yüksek ilerleme hızı ile oluşturulan yapıdakilere oranla daha küçük olmuştur.

İlerleme hızının düşük olduğu numunede (Şekil 4.24) oluşan tane büyümesi ilerleme hızının yüksek olduğu numunede (Şekil 4.25) oluşan tane büyümesinden daha büyük olduğu A-A kesitinde olduğu gibi açıkça görülmektedir.

Daha düşük büyütme oranı ile çekilen Şekil 4.30 Şekil 4.31 görüntülerinde oluşturulan yığınların zamana bağlı olarak kademeli olarak katılaştığı ve düşük ilerleme hızında daha dik, yüksek ilerleme hızında ise daha yatay katılaşma çizgileri oluştuğu görülmektedir. Düşük ilerleme hızında katılaşma çizgisinin daha dik açıda çıkmasının nedeni yığının lazerin etki ettiği bir önceki konumundaki katılaşmış kısmının, uzun süre eriyik durumunda kalan gerçek altlığa oranla daha aktif bir şekilde soğuma oluşmasına neden olması olarak açıklanabilir.

C-C Kesitine ait değerlendirmeler:

C-C kesiti 1000:1 büyütme oranı ile mikroskop altında gözlemlenmiş ve Şekil 4.26 Şekil 4.27 görüntüleri alınmıştır.

Özellikle 10mm/sn ilerleme hızı ile yapılmış olan numunede oluşan mikroyapıda B-B kesiti ile örtüşür şekilde çok büyük oranda kolonsal yapı oluşmuştur. Bu kolonsal yapı da yine lazerin ilerleme yönünde oluşmuştur.

14mm/sn ilerleme hızı ile elde edilen numunede ise oluşan mikroyapıda kolonsal yapılaşmanın yanı sıra eşeksenli yapılaşmanın yoğun olarak oluştuğu görülmektedir. Bu durum B-B kesiti ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde daha açık bir şekilde anlaşılacaktır. Çünkü B-B kesitinde yapılan incelemede kolonsal yapıların yönü yatayla büyük bir açı yapacak şekilde oluşmuştur. Bundan dolayı bu yapıların C-C kesitinden eşeksenli olarak görülmesine yol açtığı anlaşılmaktadır.

Yine A-A ve B-B kesitlerinde olduğu gibi C-C kesitinde de düşük ilerleme hızı ile imal edilen numunedeki tane boyutlarının yüksek ilerleme hızı ile imal edilendekilerden büyük olduğu soğuma hızına bağlı olarak görülebilmektedir.

Mikroskopta 200:1 büyütme ile elde edilen Şekil 4.32 ve Şekil 4.33 görüntülerinde ise zamana göre kademeli katılaşmanın oluşturduğu katılaşma çizgileri görülebilmektedir. Düşük ilerleme hızı sonucu malzemeye uygulanan enerji miktarının yüksek olduğu ve bu yüzden de yığma miktarının oransal olarak fazla olması, katılaşma çizgilerinin sahip olduğu yarıçap miktarının farklılıklarından açıkça anlaşılabilir. Bu numunelerin sahip oldukları yığın miktarı ile bilgi için Tablo 4.4'e başvurulabilir.

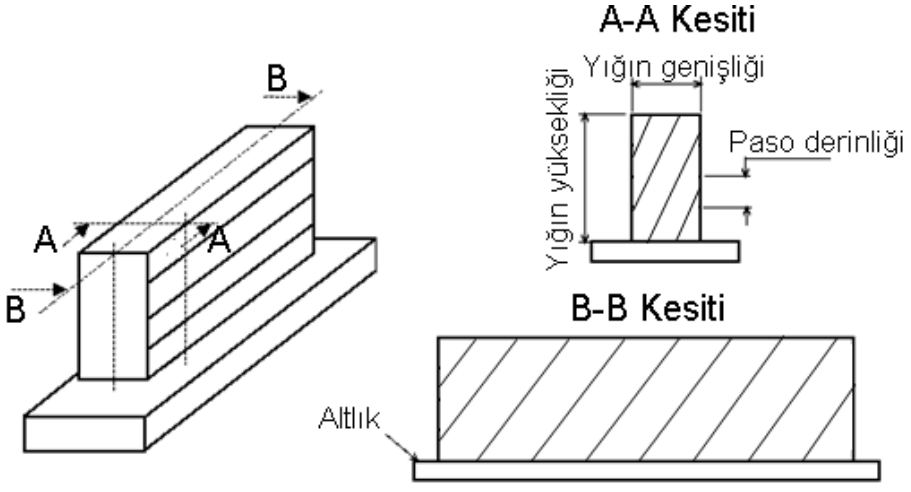
4.3. Tek Sıralı, Çok Katmanlı İşlem İle İnce Yapılı Parçaların Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi

Tek sıra halindeki yığın geometrilerinin üst üste istiflenmesi suretiyle ince duvar yapılı parçalar imal edilecektir. Elde edilen parçalar üzerinde yapılan gözlem-ölçümler yardımı ile ince yapılı parçaların imal edilebilmesi için parametre değişkenleri üzerinde durulacaktır.

4.3.1. Deneyin tanımı

Tek sıra halinde ince yapılı bir duvar oluşturacak şekilde üst üste yığın yapma işleminde öncelikle altlık malzeme üzerine belli bir uzunlukta tek sıra yığma işlemi gerçekleştirilecektir. Gerçekleştirilen bu yapının üzerine bir başka yığma işlemi gerçekleştirilecek ve bu işlem katman miktarı adedince devam edecektir. Tek sıralı çok katmanlı bir yapının temsili görüntüsü Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

İlk yığın oluşturulduktan sonra bir sonrakinin yapılabilmesi için altlık malzeme yığın yüksekliği mesafesinde aşağı indirilmelidir. Yığın geometrileri birbirleri üzerine oluşturulacakları için bir önceki yığın şeklinin düzgün bir yüzey olmayacağı ve daha da önemlisi beklenen yükseklikte olmayacağı düşünülmektedir. Bu yüzden her işlemden sonra tezgâhın altlık malzemeyi aşağı indireceği seviye paso derinliği olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.36: Tek sıralı çok katmanlı yapının şekli ve büyüklükleri

Teorik olarak birinci yığma işleminin uygulandığı altlık yüzey seviyesi yığma seviyesi olarak adlandırılırsa, bir yığma işleminden sonra paso derinliği kadar altlığın aşağı indirilmesi son yapılan yığmanın üst yüzeyinin yığma seviyesinde olması beklenir. Fakat gerek yapıdaki düzensizlikler gerekse yığma kesitinin eliptik kesitinden dolayı hiçbir zaman bir önceki oluşturulmuş olan yığın yüzeyi bir altlık yüzey gibi davranamayacaktır.

Bu deneyde farklı değerlerde paso derinlikleri (Şekil 4.36) uygulanarak gerçekleştirilen ince duvar yapılı geometrilerde paso derinliklerinin yapıdaki etkisi incelenecektir.

4.3.2. Deney parametreleri

Bir yığın oluşturabilmek için kullanılacak sabit parametreler şu şekilde olacaktır.

Tablo 4.21: Tek sıralı, çok katmanlı yığın için sabit parametreler

Lazer gücü (W)	77,5
Toz debisi (gr/dk)	3-3,4
İlerleme hızı (mm/dk)	756
Taşıyıcı Gaz debisi (l/dk)	1
Katman adedi	15

Elde edilen parçalar arasında değişken durumundaki parametre ise paso derinliğidir. Paso derinliği 5 farklı numune için 5 farklı değer kullanılarak oluşturulmak üzere şu değerleri alacaktır.

Tablo 4.22: Kullanılan paso derinlikleri

Numune no	Paso derinliği (mm)
1	0.050
2	0.075
3	0.100
4	0.125
5	0.150

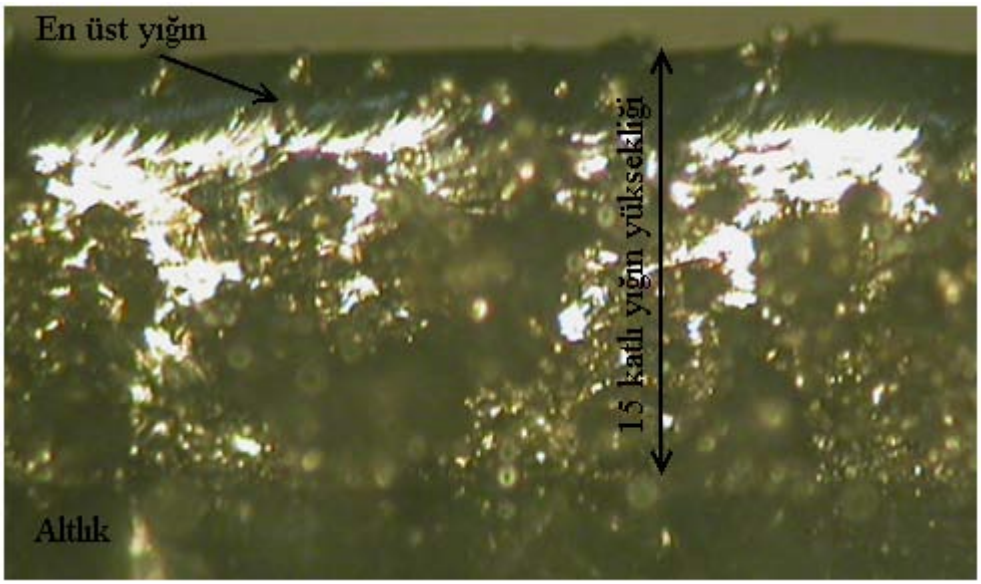
4.3.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi

Elde edilen numunelere ait görüntüler Şekil 4.37 Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37: Elde edilen numuneye ait bir resim

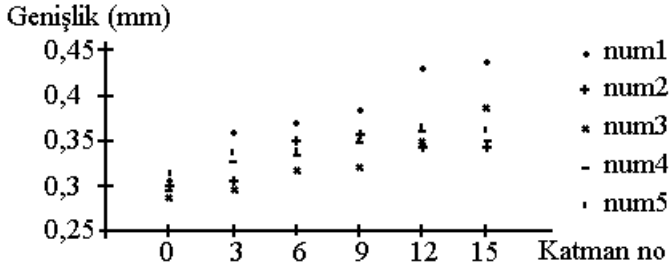
İmal edilen numuneler temizlendikten sonra epoksi kalıplara dökülerek Şekil 4.36'da görüldüğü gibi A-A kesiti ve B-B kesiti elde edilecek şekilde zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir.



Şekil 4.38: Elde edilen numuneye ait yan kısımdan mikroskop ile büyütülerek çekilmiş resim

Dağlama işleminden sonra A-A kesiti mikroskop altında 200:1 büyütme ile incelenerek çeşitli görüntünler alındı. Elde edilen görüntülerde altlık malzeme üzerine yığılan ilk katmanın en düşük genişliğe sahip olduğu ve diğer katmanlarda da yığın genişliğinin değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Şekil 4.39'da bütün numunelerin altlık yüzeyden başlayarak yığının üç katman aralıklarla genişlik ölçüm sonucunu gösteren grafik görülmektedir.



Şekil 4.39: Tek sıralı, çok katmanlı yığınların farklı seviyelerdeki genişlik değerleri (ilk yığın 0 olarak gösterilmiştir) – (A-A kesiti)

Diğer yandan yine aynı şekilde B-B kesitinde yapılan ölçümlere göre yığın yükseklik değerleri Tablo 4.23'teki şekilde oluşmaktadır.

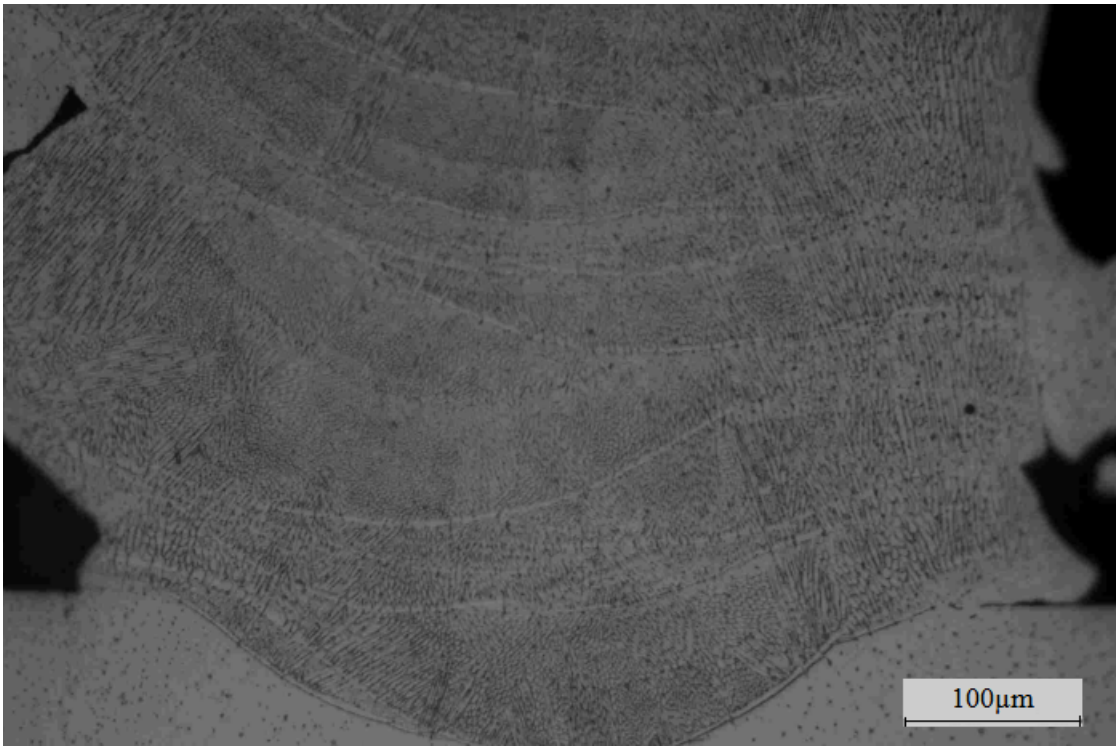
Tablo 4.23: Yığın yükseklik değerleri (B-B kesiti)

Numune no	Yığın yüksekliği (mm)
1	0,59
2	0,66
3	0,69
4	0,72
5	0,79

4.3.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi

A-A ve B-B kesitinden kesilip parlatılan numuneler Denklem (4.5)'te belirtilen dağlayıcı ile dağlandıktan sonra mikroskop altında incelenmiştir.

Şekil 4.40'ta A-A kesitinden elde edilen bir görüntü, Şekil 4.41'de ise B-B kesitinden elde edilen bir görüntü bulunmaktadır.

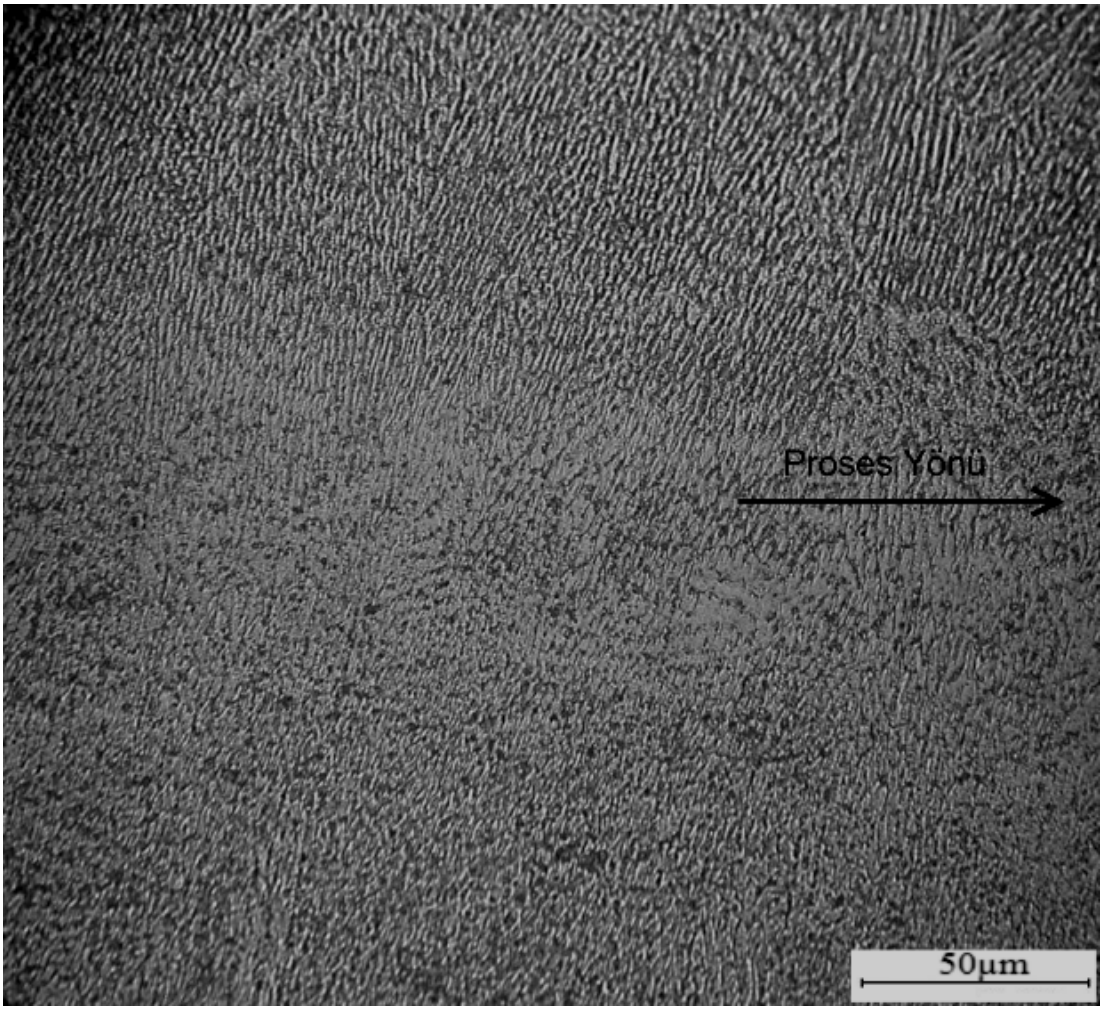


Şekil 4.40: Tanecik oluşumu (A-A Kesiti)

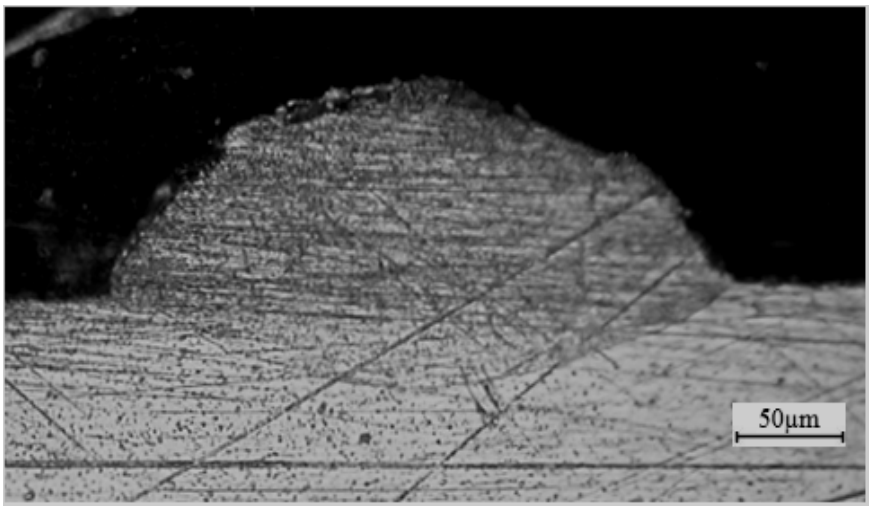
A-A kesitinde oluşan tanecik yapısı orta kısımlarda eşeksenli yapıda, kenar kısımlarda ise kolonsal yapıdadır. Kenar kısımlarında oluşan bu kolonsal yapı kenar kısımların çok daha hızlı bir şekilde soğumasından kaynaklanmaktadır. Çünkü lazer enerji yoğunluğu orta kısımlarına nazaran ışının kenar kısımlarında daha düşüktür. Bundan dolayı soğuma hızlı gerçekleşmekte ve soğuma yönüne doğru kolonsal yapı açığa çıkmaktadır.

A-A kesiti ile birlikte özellikle B-B kesitinde daha belirgin olarak görülen bir olgu ise epitaksiyal tane büyümesinin yaşanmasıdır. Yani bir katman oluşturulurken bir önceki katmanın tane yapısına uygun olarak bir katılaşmanın gerçekleşmiş olmasıdır.

Şekil 4.42'de düz altlık yüzey üzerinde elde edilen yığının Şekil 2.6'da belirtilen yığın genişliği, yüksekliği ve derinliği gibi büyüklükleri belirgin bir şekilde görülebilmektedir.



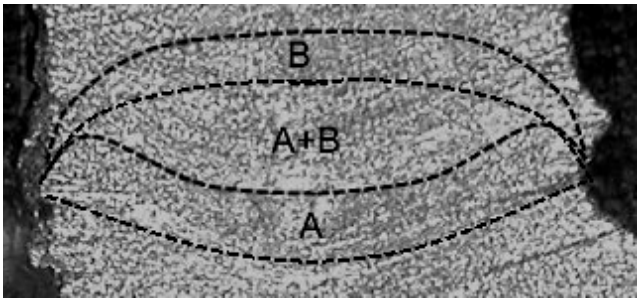
Şekil 4.41: Tanecik Oluşumu (B-B Kesiti)



Şekil 4.42: Düz bir yüzey üzerine oluşturulmuş tek katmanlı yığının A-A kesiti görüntüsü

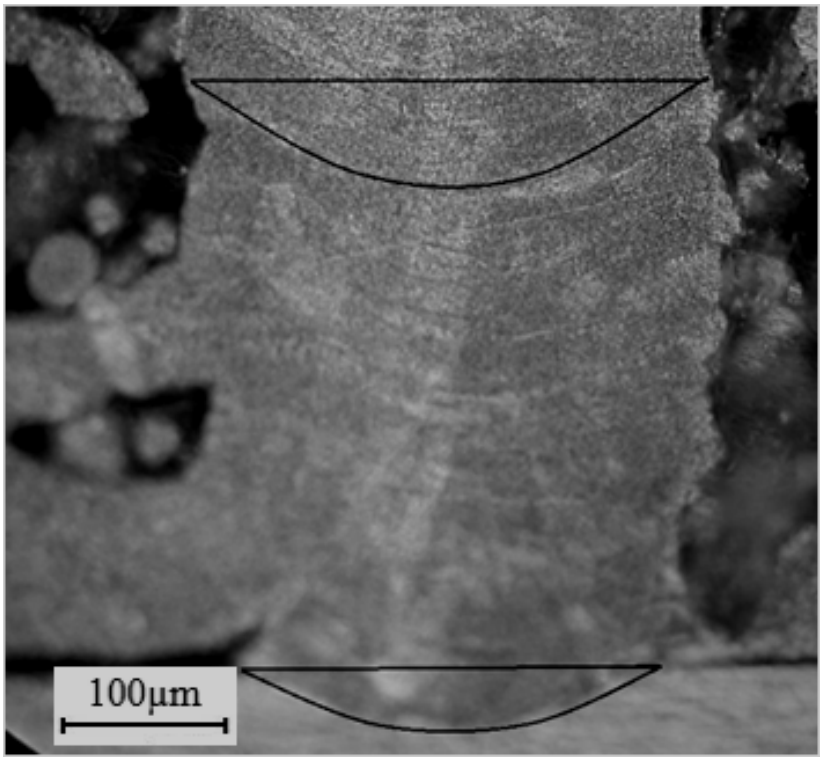
Şekil 4.43'te ise üst üste ardışık olarak oluşturulan iki yığının yine A-A kesitinden görüntüsünün mikro yapısı görülmektedir. Resimde A ilk yığını B ise A üzerine

oluşturulan ikinci yığını temsil etmektedir. B yığını oluşturulurken A yığını üzerinde bir miktar eriyik havuzu oluşur ve bu kısma yeni beslenen tozlar da eriyerek karışır (A+B). Resimde bu oluşum net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.43: Ardışık iki yığının oluşumu sonucu ortaya çıkan mikro yapı

Elde edilen görüntülerde bir işlemde gerçekleşen yığının geometrisinin altlık geometrisine göre değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Yığın derinliği bakımından oluşan fark Şekil 4.44'te açıkça görülmektedir.



Şekil 4.44: Farklı katmanlardaki yığın kesiti farklılığı

4.3.5. Parçaların mekanik olarak incelenmesi

Numunelerin B-B kesitinden sertlik değerleri ölçülmüştür. Ölçüm işlemi Instron Wolpert Testor 2100 mikrosertlik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemi 100gr.lık uç ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde en alt katmandan başlayarak en üst katmana kadar eşit mesafelerde 7 ölçüm gerçekleştirilmiştir. 3 nolu numuneye göre yapılan ölçüm sonuçları Tablo 4.24'te ve Şekil 4.45'te verilmiştir.

Tablo 4.24: Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Ölçüm No	Sertlik (Vickers – HV)
1	233
2	225
3	205
4	205
5	192
6	190
7	185



Şekil 4.45: Yapılan sertlik ölçümlerinin numaralı olarak gösterilmesi

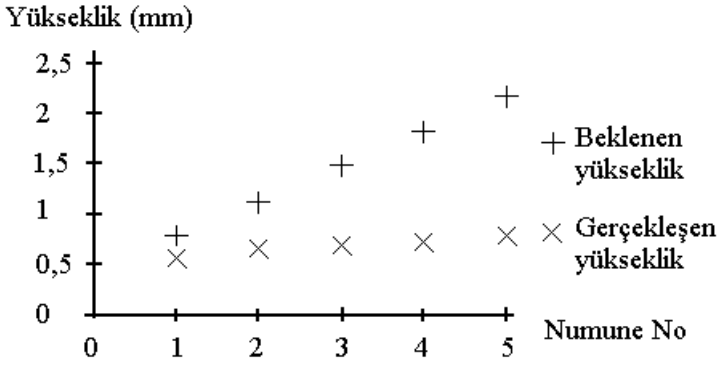
4.3.6. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi

Tablo 4.23'ten görüleceği gibi paso derinlik değerleri arttıkça elde edilen çok katmanlı yığının da yüksekliği artmaktadır. Tek sıra ve tek katman olarak oluşturulan yığının kesitinden yapılan ölçüm sonucunda yığın genişliği ve yığın yüksekliği değerleri ortalama olarak sırasıyla 0,3mm ile 0,085mm olduğu ölçülmüştür. Düz yüzey üzerinde oluşturulan yığının sadece boyutsal ölçüleri dikkate alındığında üst üste 15 katman şeklinde oluşturulan yapının genişliği ideal olarak 0,3mm, yüksekliğinin ise numunelere göre Tablo 4.25'teki şekilde çıkması beklenir.

Tablo 4.25: İdeal yığın yüksekliği ve paso derinlikleri dikkate alınarak oluşması beklenen yığın yükseklikleri

Numune no	Beklenen yığın yüksekliği (mm)
1	0,785
2	1,135
3	1,485
4	1,835
5	2,185

Fakat elde edilen görüntülerde böyle olmadığı görülmüş ve gerçekte elde edilen yığınlar beklenenden çok daha düşük ölçülerde (yükseklik bakımından) çıktığı görülmüştür, Tablo 4.23 ve Şekil 4.46.



Şekil 4.46: Beklenen ve gerçekleşen yığın yüksekliklerinin karşılaştırmalı grafiği

Bu duruma oluşturulmakta olan yığının eriyik durumda iken yerçekiminin etkisi ve bir önceki yığının eğimli geometrisinin de etkisi ile aşağı doğru akışının neden olduğu söylenebilir. Bu akış sonucunda akış tepe kısımdan kenar kısımlara doğru

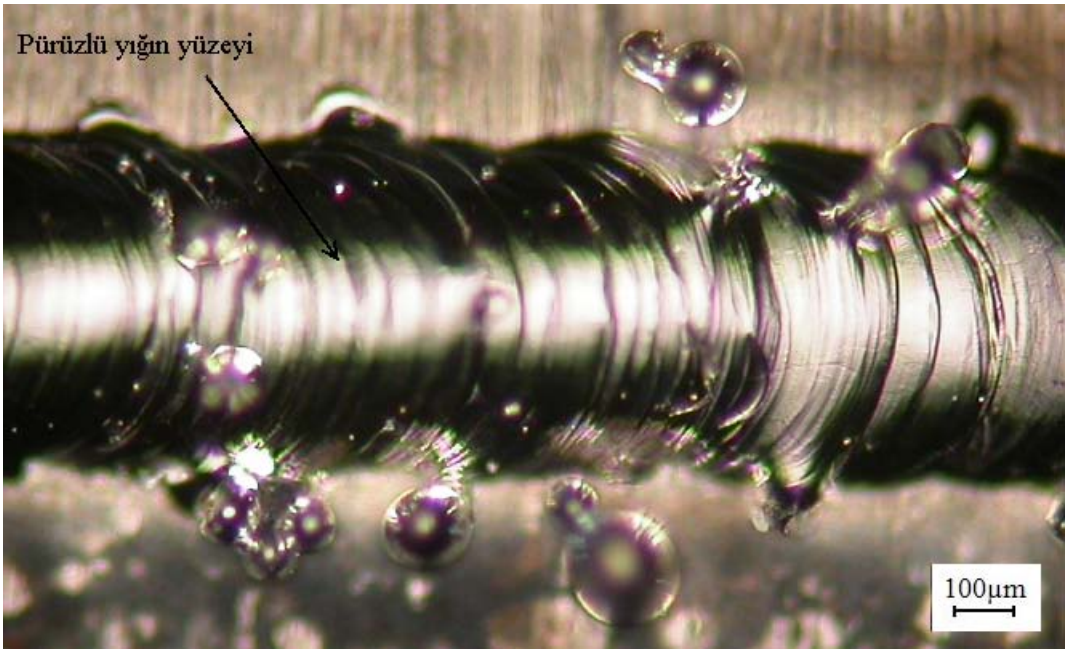
oluşmakta ve malzeme kenar kısımları doldurmaktadır. Dolayısıyla elde edilen yükseklik değeri beklendiği gibi oluşmamaktadır.

Bütün numunelerde yükseklik değerleri birbirlerinden farklı çıktığı görülmüştür. Bu sonucun çıkmasındaki en önemli etken değişken olarak belirlenen paso yüksekliği değeridir. Paso yüksekliği değeri arttıkça yığın yüksekliğinin de arttığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak ise her katmandan sonra lazer ışınının tekrar odaklanması sonucunda lazerin en yoğun enerjiye sahip olduğu minimum spot büyüklüğünün oluştuğu odak uzaklığının paso derinliğinin artması ile giderek artan oranda yığından daha üst seviyede oluşması olduğu söylenebilir. Yığın seviyesinden daha üst seviyede oluşan minimum spot tozların artan oranda lazerden etkilenmesine ve aynı oranda eriyik içerisine yığılmasına neden olmaktadır. Fakat bu durum lazer ışınının bir önceki oluşturulan yığının üst yüzeyinde eriyik havuzu oluşturacak yeterli enerji yoğunluğunu sağlayıncaya kadar devam edeceği, enerji yoğunluğunu kaybetmeye başladıktan sonra yığılan toz miktarında azalma gözleneceği düşünülmektedir. Bunu gözlemleyebilmek için ise hem daha büyük paso derinliğine hem de daha çok sayıda katman miktarına sahip yapılar oluşturmak gerekmektedir.

A-A kesitlerinde elde edilen görüntülerden altlık üzerine oluşturulan ilk katmanda oluşan yığının derinliği üst katmanlardaki yığınların derinliklerinden daha sığ olduğu açıkça görülmektedir, Şekil 4.44.

Bu durumun iki önemli sebepten kaynaklandığı söylenebilir.

İlk olarak düz bir yüzeyin lazer enerjisini soğurma miktarına nazaran pürüzlü yüzeyin lazer enerjisini soğurma miktarının daha yüksek olması prensibi çerçevesinde yığın yüzeyindeki düzensizlik ve pürüzlülükten dolayı daha büyük ölçülerde yığın derinliği oluşmuştur. Çünkü Şekil 4.47'den de açıkça görüldüğü gibi toz yığma prosesi sonrası yığının üst yüzeyi pürüzlü ve düzensiz bir yapıda olmaktadır.



Şekil 4.47: Yığın geometrisinin üstten görüntüsü

Diğer sebep ise lazerin etki ettiği yüzey alanla ilişkilidir. Bir önceki yığın üzerine etki eden lazer ışını düz yüzeye nazaran daha büyük yüzey alana etki etmektedir. Yüzey alan büyümesi iki şekilde gerçekleşmektedir. İlk olarak eriyik haldeki yığının katılaşma esnasında üzerine düşen tozların yüzeyle bir bağ oluşturarak erimeden yüzey üzerinde kalması lazerin etki ettiği yüzeyin yüzey alanını artırmaktadır. Diğer yandan bir önceki yığın geometrisi eğrisel bir yüzeye sahip olduğu için aynı spot büyüklüğüne sahip lazer ışını düzlemsel yüzeye nazaran daha çok yüzeye etki edecektir.

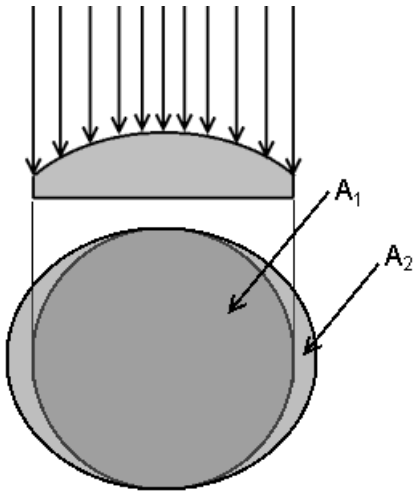
Tozların yığın üzerine birikerek yüzey alanı artırması olayı lazer spotunun temas ettiği alanla ilişkilidir ve o alan sabit kalmak kaydıyla yüzey alanı artmaktadır. Bu da bir önceki işlemde oluşturulan yığın üzerine oluşturulacak yığının yığın derinliğinin artmasına neden olacaktır.

İkinci durumun ise iki farklı sonucu olacaktır. Lazer ışını odağının düzlemsel bir yüzey yerine eğrisel bir yüzey üzerine etki etmesi sonucu yüzey formundaki makro boyuttaki eğrilik lazerin temas ettiği alanın büyümesine neden olmaktadır. Bu da hem bir alt katman üzerinde oluşan eriyik havuzunun daha büyük çapta olmasına ve hem de lazerin etki ettiği alana düşen toz miktarının artmasına ve daha fazla miktarda

tozun erimesine neden olmaktadır. Eriyik havuzunun büyük olması özellikle yığın genişliğinin büyük olmasına eriyen toz miktarının artması ise yığının üst kısmının yani yığın yüksekliği ve buna bağlı olarak yine yığın genişliğinin de daha fazla olmasına neden olmaktadır.

Aynı spot büyüklüğüne sahip lazer ışınının eğrisel yüzeyle yapmış olduğu etkileşim Şekil 4.48'de görülmektedir. Şekilde A_1 alanı lazerin düz yüzeyle etkileşime girdiği alanı, A_2 ise eğrisel yüzeyle yapmış olduğu etkileşimi temsil etmektedir. A_2 alanı bir önceki işlemde oluşturulan yığının eğrisel üst yüzeyinin açılımını göstermektedir.

Bu yorum Şekil 4.39'daki grafikte de büyük oranda görülebilmektedir. Grafikten üst katmanlara gidildikçe numune genişliklerinin artan oranda oluştukları çıkarılabilmektedir.



Şekil 4.48: Lazer ışınının düz ve eğrisel yüzeyle yapmış olduğu etkileşim şekli

Oluşturulan numunelerin A-A kesiti ve B-B kesiti alınarak 1000:1 büyütme oranı ile mikroyapıları incelenmiştir. A-A kesitinde taneciklerin oluşumu ilk katman ve ardışık katmanlarda kısmen farklılık göstermektedir. İlk katmanda oluşturulan yığın ağırlıklı olarak kolonsal tanecikleri barındırmaktadır. Diğer yığınlarda ise orta kısımlarda eşeksenli bir yapı gözlenmektedir. Oluşturulan bütün yığınların kenar kısımları kolonsal taneciklerden oluşmaktadır. Kenar kısımlarda oluşan kolonsal taneciklerin orta kısımlarda oluşmamasının nedeni olarak lazer ışınının Gauss profiline uygun olarak orta kısımlarda daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olması ve

bunun sonucunda orta kısma uygulanan enerji miktarının kenar kısımlara oranla daha fazla olmasından dolayı orta kısımların daha geç soğuması sonucu olduğu gösterilebilir.

Hem A-A kesiti hem de B-B kesitindeki tanecik yapıları incelendiğinde birbirleri üzerine oluşturulmuş olan yığın malzemeleri aynı olduğu için tanecik yapıları da bir önceki yığının tanecik yapısı ile devam niteliğinde olduğu ve epitaksiyal tane büyümesi olduğu söylenebilir.

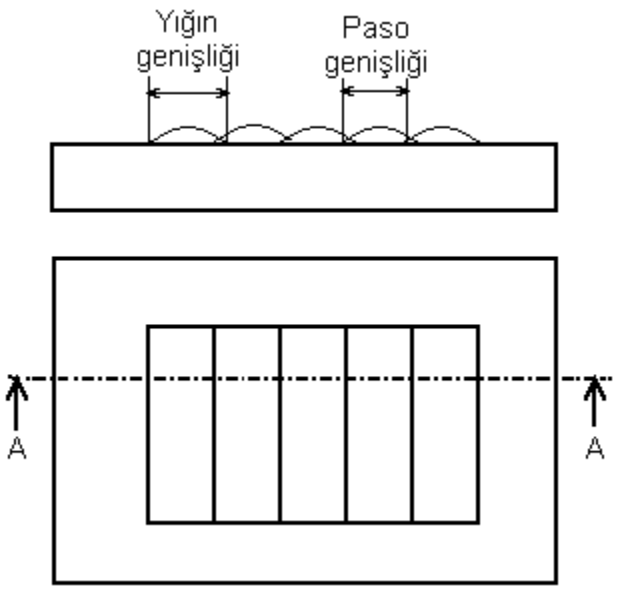
Yapılan mikrosertlik ölçümlerinde altlığa yakın kısımlarda sertlik değeri yüksek, daha üst katmanlarda ise sertlik değeri azalan bir oranda düşük çıkmıştır. Bunun nedeni olarak ise ilk yığınların oluşturulduğu zamanlarda altlığın oda sıcaklığında olmasından dolayı daha çabuk soğuduğu, sonraki katmanlarda ise bir önceki katılaşan yığının sahip olduğu sıcaklığın soğumayı yavaşlatarak iri taneli oluşmasına neden olması olarak gösterilebilir.

4.4. Çok Sıralı, Tek Katmanlı Bir Yapının Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi

Amaç bir altlık üzerine tek katmanlı yığma işlemi yapmak değildir. Bu işlem literatürde kaplama olarak geçmektedir. Fakat çok katmanlı bir işlem de yine altlık üzerine yığılmış olan çok sıralı ilk katman üzerine oluşturulduğu için altlık üzerindeki ilk yapının incelenmesi çok katmanlı bir yapı için bir alt yapı oluşturacaktır.

4.4.1. Deneyin tanımı

Çok sıralı terimi yığma işleminin birden çok yan yana gelecek şekilde gerçekleştirilmesidir. İlk sıra yığın gerçekleştirildikten sonra aynı özelliklere sahip ikinci bir yığının yan tarafa gerçekleştirilebilmesi için paso genişliği olarak adlandırılacak olan bir mesafe yanal ilerleme miktarı verilecektir, Şekil 4.49.



Şekil 4.49: Tek katmanlı, çok sıralı yapının şekli

Bir yığma işleminde bir tek hattan oluşan yığının geometrik özelliklerinin yanı sıra yan yana yapılan işlemde paso genişliği miktarı da çok önemlidir. Paso genişliği gereğinden büyük alındığında parça içerisinde boşluklar olabilecek, yığınlar arasında birbirlerine temas etmeme, yapışmama problemi yaşanabilecektir. Aynı şekilde paso genişliği gereğinden küçük alındığında da yığınlar birbirleri üzerine binecek ve düzensiz bir yapılaşmaya yol açacaktır.

Bu deneyde özellikle paso genişliği parametresi göz önünde bulundurularak oluşturulan yapının oluşumu incelenecektir. Ardışık olarak yan yana oluşturulacak yığınların gerçek ölçülerini çıkarabilmek için aynı numune üzerinde belli bir uzaklıkta tek sıra yığın elde edilecektir.

4.4.2. Deney parametreleri

Yığın oluşturma sabit parametreleri Tablo 4.26'daki şekildedir.

Tablo 4.26: Çok sıralı, tek katmanlı yığın için sabit parametreler

Lazer gücü (W)	77,5
Toz debisi (gr/dk)	2,9-3,1
İlerleme hızı (mm/dk)	756
Taşıyıcı Gaz debisi (l/dk)	1
Sıra adedi	8

Paso genişliği ise 4 farklı numune için 4 farklı değer kullanılarak oluşturulmak üzere şu değerleri alacaktır.

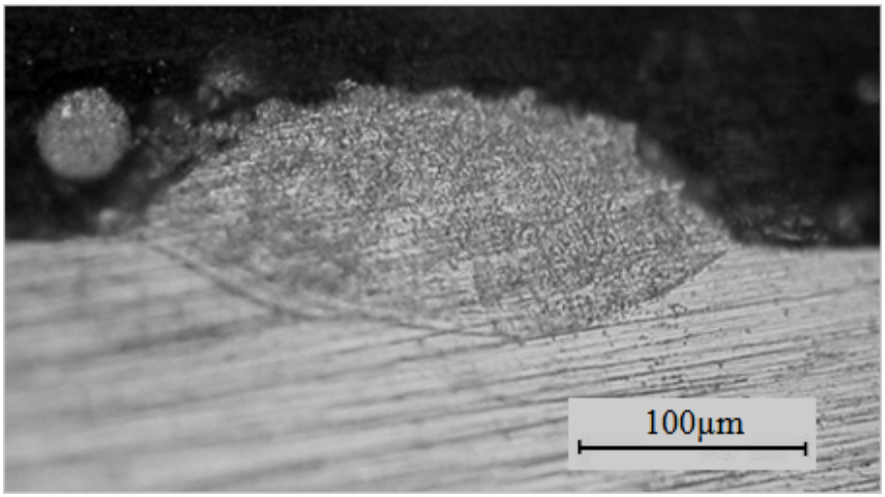
Tablo 4.27: Kullanılacak olan paso genişlikleri

Numune no	Paso genişliği (mm)
1	0.200
2	0.250
3	0.300
4	0.350

4.4.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi

Elde edilen numuneler temizlendikten sonra 50:1 büyütme oranı ile mikroskopta fotoğrafları çekildi. Bu fotoğraflar Şekil 4.51'de görülmektedir.

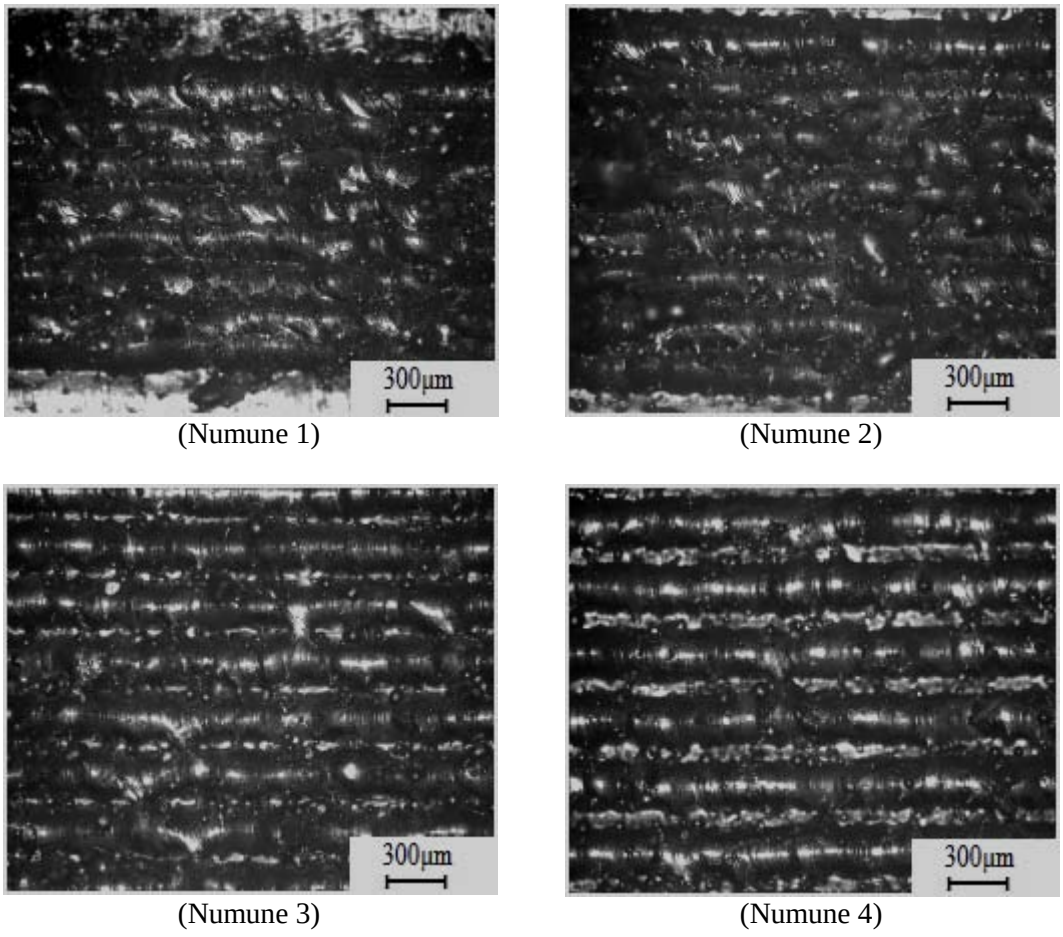
Tek sıra olarak elde edilen yığınlar A-A kesitinde oluşan ölçüleri dikkate alınarak yığın genişliği ve yığın yükseklikleri ortalama olarak sırası ile 0,285mm ve 0,08mm olduğu ölçülmüştür, Şekil 4.50.



Şekil 4.50: Tek sıra oluşturulan yığının A-A kesiti görüntüsü (Numune 2)

Şekillerden paso genişliğinin ortalama yığın genişliğinden düşük olan 0,2mm ve 0,25mm olduğu numunelerde yığınların birbirleri üzerine binme yaptıkları görülmektedir (Numune 1 ve 2).

Paso genişliğinin yığın genişliğinden büyük olduğu (0,3mm ve 0,35mm) numunelerde ise yığınlar arasında bir ilişki olmadığı, arada boşluklar olduğu görülmektedir (Numune 3 ve 4).



(Numune 1) (Numune 2)

(Numune 3) (Numune 4)

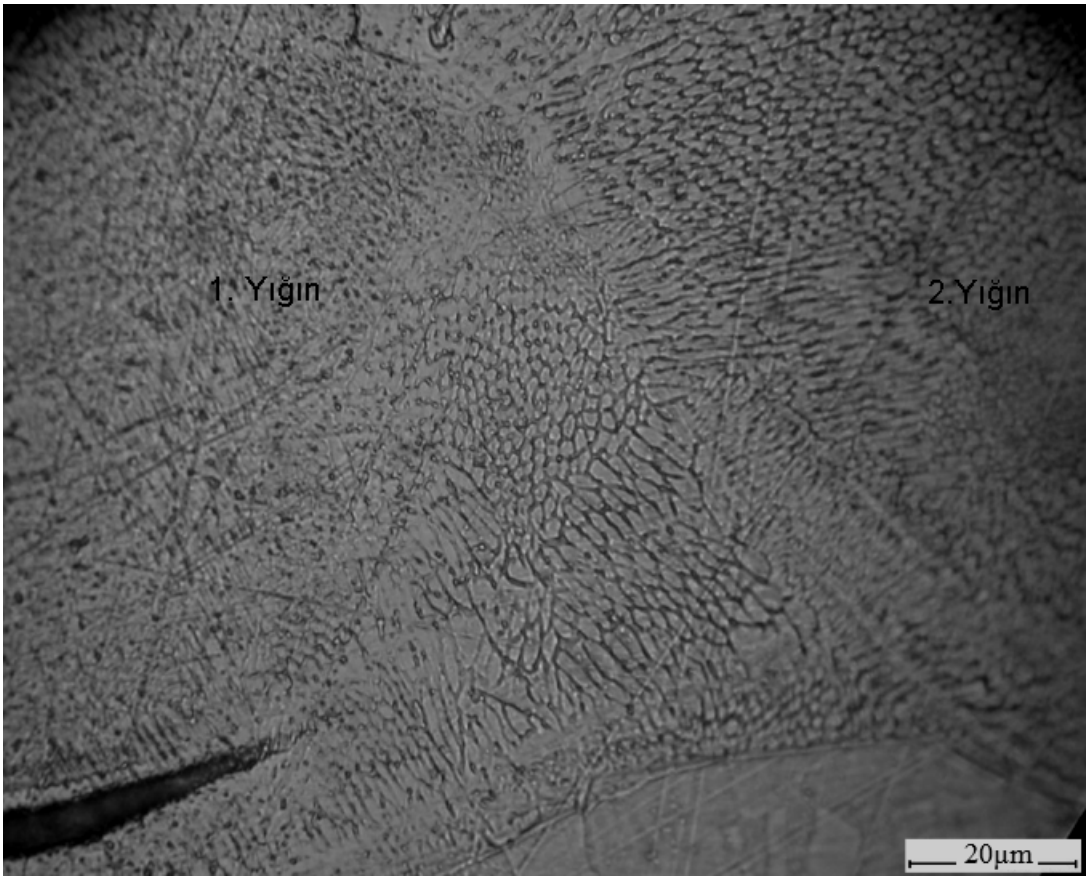
Şekil 4.51: Numunelerin üst yüzeyinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)

4.4.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi

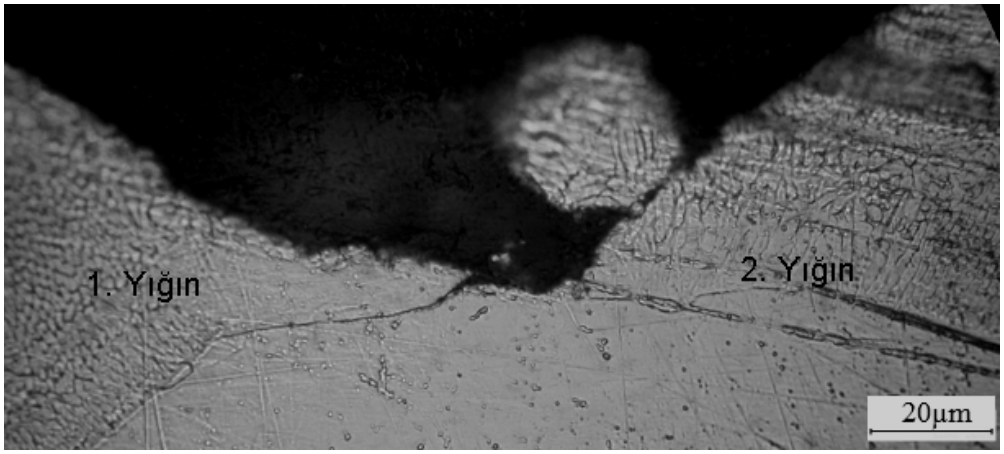
Numuneler epoksi içerisine alınarak Şekil 4.49'da görüldüğü şekilde A-A kesiti oluşturacak şekilde zımparalanarak parlatma işleminden geçirilmiştir. Daha sonra Denklem (4.5)'teki dağlayıcı kullanılarak dağlanarak mikroskop altında incelenmiştir.

Verilen paso genişliklerine göre ardışık olan yığınların birbirleri üzerine binmiş olduğu 1 nolu numune ile birbirlerine temas etmemiş olduğu 4 nolu numune 1000:1 büyütme oranı ile büyütülerek sırasıyla Şekil 4.51 ve Şekil 4.53'teki görüntüler

alınmıştır. Bu görüntülerde taneciklerin oluşumu ardışık yığınların birbirleri arasındaki ilişki ile birlikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

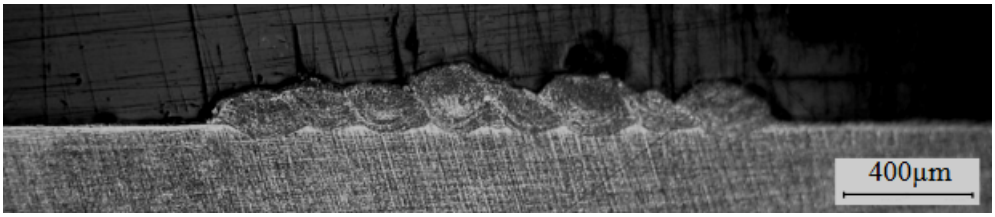


Şekil 4.52: Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-Numune 1)



Şekil 4.53: Tanecik oluşumu (A-A Kesiti-Numune 4)

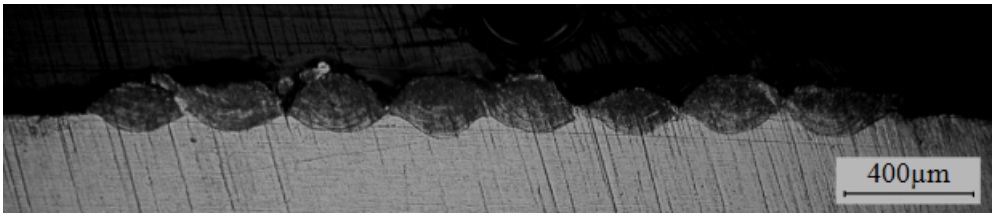
Diğer yandan 50:1 büyütme oranı ile yine A-A kesitinden alınan görüntüler Şekil 4.54'te gösterilmiştir.



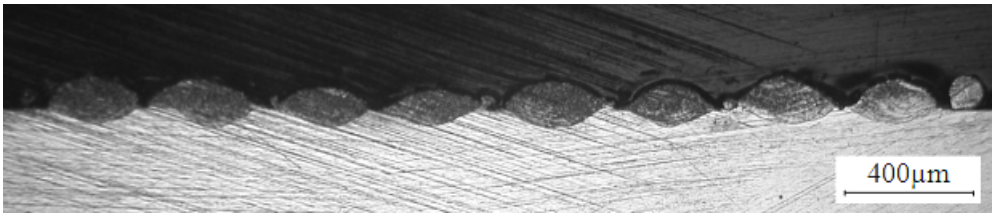
(Numune 1)



(Numune 2)



(Numune 3)



(Numune 4)

Şekil 4.54: Numunelerin A-A kesitinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)

4.4.5. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi

A-A kesitinde dağlamadan sonra elde edilen Şekil 4.54'teki görüntülerden anlaşılacağı üzere paso genişliği yığın genişliğinden düşük olduğu durumlarda beklendiği gibi sonraki oluşturulan yığın bir önceki yığının bir miktar üstüne binmiştir. Bu da paso genişliği miktarı ile alakalıdır.

Paso miktarının yığın genişliği miktarından düşük olduğu durumlarda ilk yığından sonraki yığma işlemlerinde lazer altlık yüzey üzerine etki ederken bir yandan da paso genişliğine bağlı olarak önceki oluşturulan yığının üst yüzeyine etki edecektir. Yani iki farklı altlık yüzeyi durumu söz konusu olmaktadır.

Paso miktarı arttıkça yığın kümesinin üst kısımlarının oluşturduğu üst yüzeyin eğriselliği de artmakta daha dalgalı hale gelmektedir. Şekil 4.51 ve Şekil 4.54'te açıkça görülmektedir ki paso genişliği yığın genişliğinden büyük olduğu durumlarda bu problem daha fazla olmakta hatta birbirleri ile temas etmeyecek kadar büyük paso genişliğinde tek bir yüzeyden bile bahsetmek imkânsız hale gelmektedir, Numune3 ve Numune4.

Toz besleme sistemindeki düzensizliklerin aynı özelliklerde oluşturulan yığınların farklı boyutlarda çıkmasına neden olduğu da görüntülerden açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Özellikle üst üste binme olayının yaşandığı 1 ve 2 nolu numunelerde görüldüğü üzere ilk yığılan katmanda yaşanan fazla toz yığılması durumu bir sonraki oluşturulan yığının geometrisine negatif etki yapmaktadır. Bunun nedeni olarak ise gereğinden büyük değerlerde oluşan yığın yan tarafına oluşturulacak yığın için beslenen tozları engelleyerek toplam beslenen toz miktarında düşüşe sebep olduğu düşünülmektedir.

Birbirlerinden belirgin bir şekilde farklı olan 1 nolu numune ile 4 nolu numunenin tanecik oluşumu Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'ten incelenmiştir. Ardışık yığınların birbirleri ile kesişme olmayan 4 nolu numunede yığınlarda oluşan tanecik oluşumunun birbirlerinden etkilenmediği anlaşılmaktadır. 1 nolu numunede ise sonraki oluşturulan yığın kısmen ilk oluşturulan yığının üzerine gelecek şekilde oluşturulduğu için ilk yığın ikinci yığın için kısmen altlık vazifesi görmüştür. Bunun neticesinde ikinci yığın oluşumu esnasında ilk yığınla temas eden kısımlarda ilk yığına doğru uzayan kolonsal yapıların oluştuğu anlaşılmıştır.

4.5. Çok Sıralı, Çok Katmanlı İşlem İle 3 Boyutlu Parçaların Oluşturulması ve İşlem Parametrelerinin İncelenmesi

Bir parçanın oluşturulabilmesi için çok sıralı olarak oluşturulan bir katmanın üzerine aynı özelliklere sahip başka bir katmanın oluşturulması hedeflenmiş ve elde edilen

sonuçlar gerek kesit görüntüsü bakımından gerekse üst yüzey görüntüsü bakımından incelenmiştir. Yığınların sıra sıra ve üst üste olduğu pozisyonlardaki oluşum davranışları üzerine inceleme gerçekleştirilmiştir.

4.5.1. Deneyin tanımı

Öncelikle bir katman kalınlığında yığınlar çok sıralı olacak şekilde yan yana oluşturulacaktır. Daha sonra paso derinliği miktarınca parça aşağı doğru tekrar konumlandırılarak önceki oluşturulan katman üzerine yine aynı sayıda yığın oluşturulacaktır. Elde edilen numunelerde değişken parametre bakımından yapının genel olarak nasıl bir davranış sergilediği, yığın genişlikleri ve yüksekliklerinin nasıl geliştiği ve oluştuğu hakkında bir takım yargılara varılacaktır.

Bir diziliş içerisinde konumlanan yığınların gerçek büyüklüklerini ölçebilmek için ana yapıdan uzak bir kısımda tek bir yığın da ana yapıya ek olarak oluşturulacaktır.

4.5.2. Deney parametreleri

Yığın oluşturma sabit parametreleri Tablo 4.28'deki şekildedir.

Tablo 4.28: Çok sıralı, çok katmanlı yığın için sabit parametreler

Lazer gücü (W)	77,5
Toz debisi (gr/dk)	2,9-3,1
İlerleme hızı (mm/dk)	756
Taşıyıcı Gaz debisi (l/dk)	1
Sıra adedi	7
Katman adedi	5

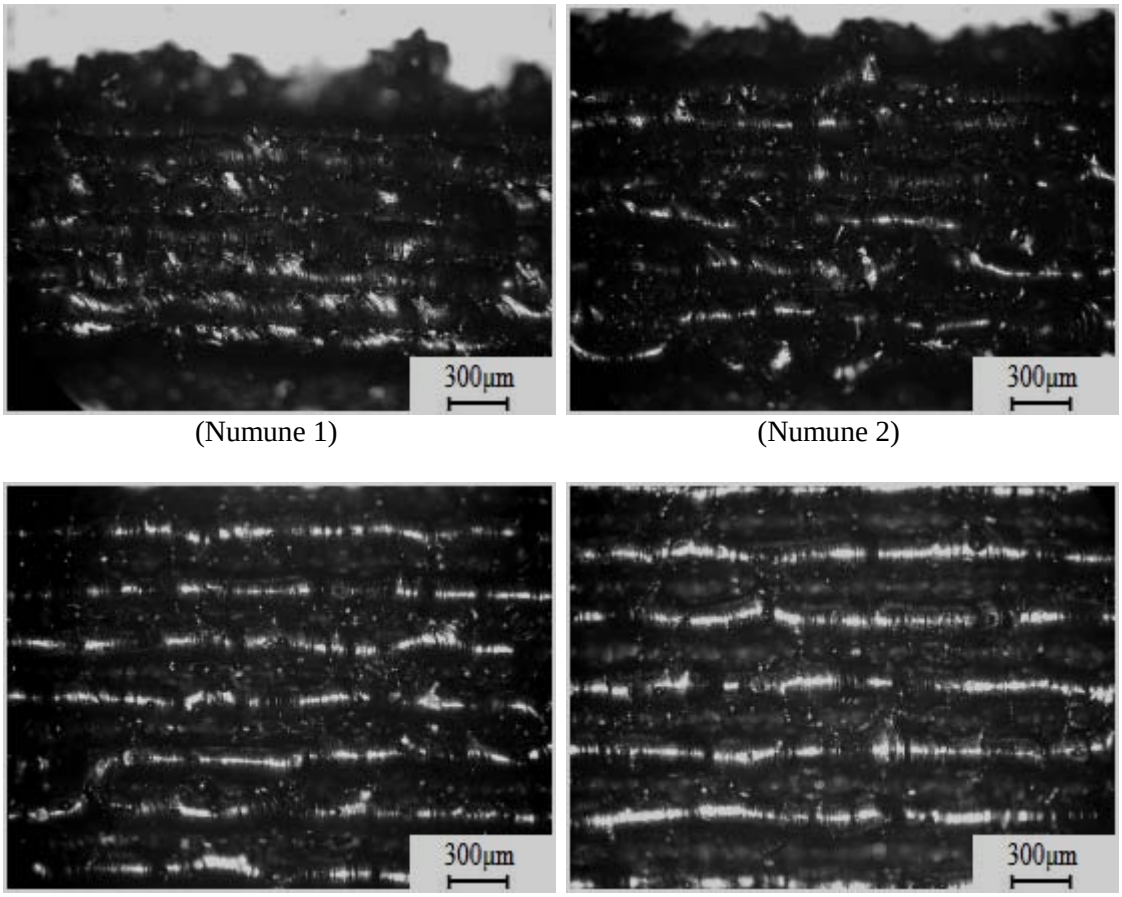
Oluşturulan yapının paso derinliği de sabit olarak tutulup 0,1mm olarak belirlenmiş, paso genişliği ise değişken olarak belirlenmiştir. 4 farklı numuneye ait paso genişliği değerleri şu şekildedir.

Tablo 4.29: Numuneler için kullanılan paso genişlikleri

Numune no	Paso genişliği (mm)
1	0.20
2	0.25
3	0.30
4	0.35

4.5.3. Parçaların boyutsal olarak incelenmesi

Elde edilen numuneler öncelikle temizlenerek mikroskop altında incelendi. Üst yüzeyinden alınan mikroskop görüntüleri Şekil 4.55'te verilmiştir. A-A kesitinden elde edilen görüntülerde tek bir yığın olarak oluşturulan yığın geometrisinin aynı parametrelerin uygulandığı bir önceki örnekte olduğu gibi olduğu görülmüştür. Yani yığın genişliği 0,285mm, yığın yüksekliği ise 0,08mm olarak ölçülmüştür.



(Numune 1) (Numune 2)

(Numune 3) (Numune 4)

Şekil 4.55: Çok sıralı, çok katmanlı oluşturulan numunelerin üst yüzeyinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)

A-A kesitinde elde edilen Şekil 4.56'daki görüntüler üzerinde yapılan ölçümlere göre yığınların parçaların altlık yüzeyinden itibaren oluşan yükseklikleri Tablo 4.30'daki şekilde gerçekleşmiştir.

Tablo 4.30: Numunelerin ölçülen yükseklikleri

Numune no	Parça yüksekliği (mm)
1	0.47
2	0.43
3	0.38
4	0.37

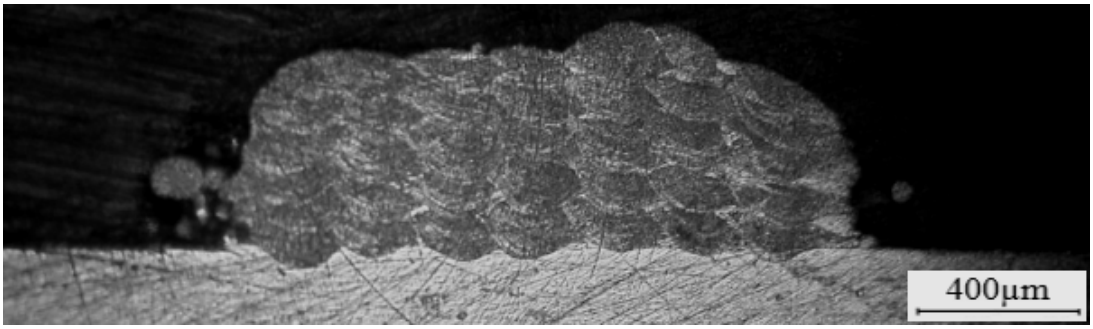
4.5.4. Parçaların metalografik olarak incelenmesi

Numuneler epoksi içerisine alındıktan sonra A-A kesitini oluşturacak şekilde zımparalanıp parlatılmış ve dağlanarak mikroskoptan 50:1 büyütme ile Şekil 4.56'daki görüntüler alınmıştır.

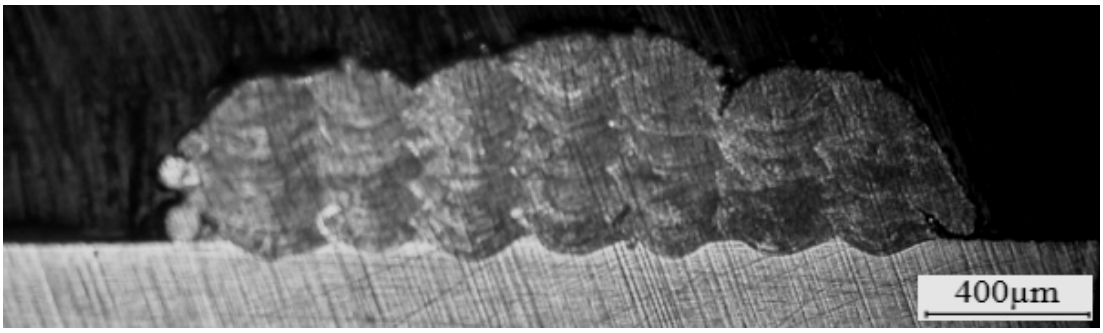
Diğer yandan Şekil 4.57'de 500:1 büyütme oranı ile alınan görüntüde yığınlar arasında diziliş sırasına göre oluşmuş olan tanecik yapılanması ve katılaşma gösterilmiştir.

Yan yana ardışık olarak oluşturulan yığınlardan birbirleri ile temas eden yapılar Şekil 4.57'dekine benzer şekilde bir mikroyapıya sahiptirler.

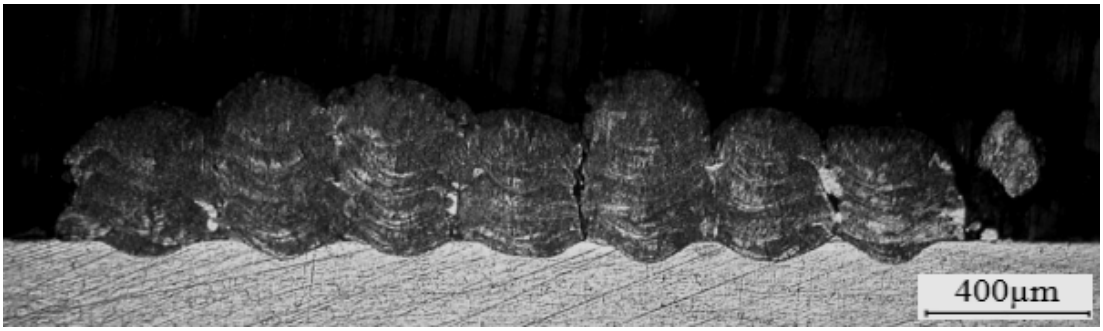
Birbirleri ile hiç temas etmeyen 4 nolu numunedeki yapıların ise Bölüm 4.3'teki gibi tek sıralı, çok katmanlı yapının sahip olduğu mikroyapıya benzediği gözlenmiştir.



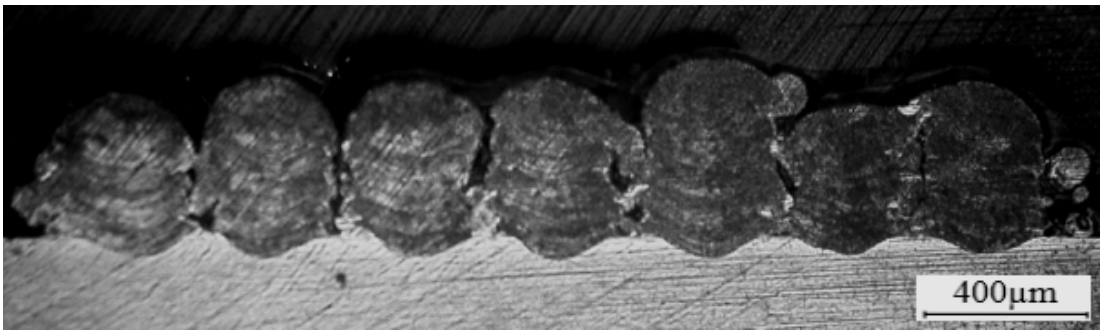
(Numune 1)



(Numune 2)

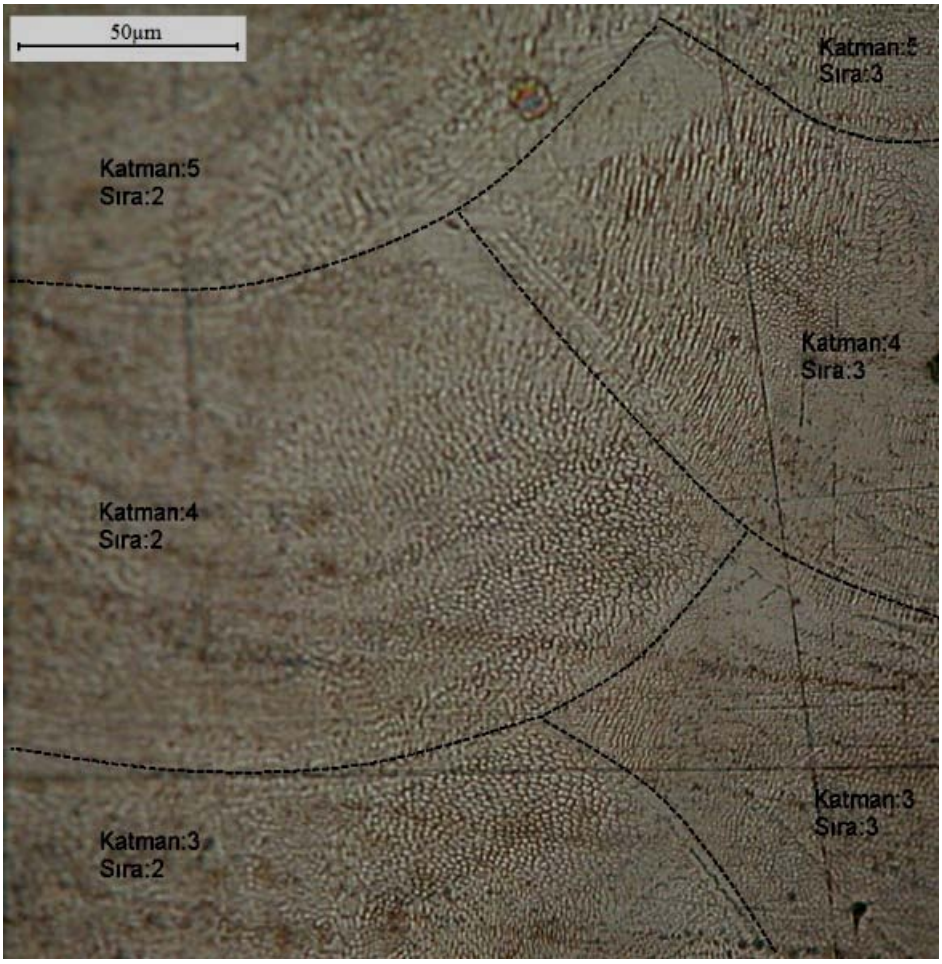


(Numune 3)



(Numune 4)

Şekil 4.56: Çok sıralı, çok katmanlı oluşturulan numunelerin A-A kesitinden alınan mikroskop görüntüleri (50:1)

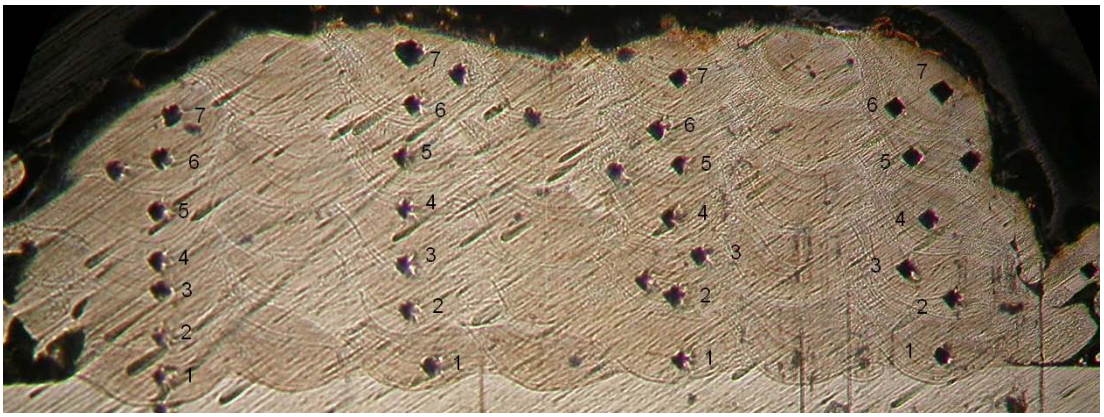


Şekil 4.57: A-A kesitinden alınan bir görüntü (Numune 1)

4.5.5. Parçaların mekanik olarak incelenmesi

Numunelerin A-A kesitinden mikrosertlik test cihazı ile sertlikleri ölçülmüştür. Ölçüm işlemi 100gr.lık uç ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm 1., 3., 5. ve 7. sıralarda gerçekleştirilmiş ve her sırada ilk katmandan başlayarak en üst katmana kadar 7 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir.

Yapılan ölçümlerde numuneler arasında farklılık oluşturacak bir sonuç alınmamıştır. 1 nolu numuneye ait olan ölçüm sonuçları Şekil 4.58 ve Tablo 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.58: Mikrosertlik ölçümü (Numune 1)

Tablo 4.31: Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Numune 1)

Ölçüm No	Sertlik (Vickers – HV)			
	Sıra 1	Sıra 3	Sıra 5	Sıra 7
1	233	222	225	216
2	229	218	215	211
3	218	213	211	208
4	208	211	212	205
5	198	215	210	198
6	190	208	208	185
7	190	192	195	180

4.5.6. Sonuçların tartışılması ve irdelenmesi

Paso genişliğinin azalması ile yan yana oluşturulan yığınların üst üste binme miktarında artış olduğu tek katmanlı olarak yapılan bir önceki örnekte olduğu gibi bu örnekte de Şekil 4.56'dan açıkça görülmektedir.

Buna ek olarak paso genişliği değeri azaldıkça oluşturulan parçanın toplam yüksekliği de artmaktadır. Sabit tutulan paso yüksekliğinin 0,1mm olduğu, ortalama yığın yüksekliğinin ise 0,08mm olduğu dikkate alınırsa ideal şartlarda oluşturulan yapının yüksekliği 0,48mm olması gerekir. A-A kesitinden elde edilen Şekil 4.56'daki görüntüler üzerinde yapılan ölçümlere göre yığınların oluşturduğu parçaların altlık yüzeyinden itibaren yükseklikleri Tablo 4.30'daki şekilde gerçekleşmiştir.

Tablo 4.30'daki sonuçlar göz önünde bulundurulursa ardışık yığınların üst üste binme miktarlarının (0,085mm) en çok olduğu 1 nolu numunede elde edilen parçanın yüksekliği 0,47mm olduğu görülmüştür.

Uygulanan parametrelere göre üst üste binme olayının yaşandığı 2 nolu numunede (0,035mm) elde edilen parçanın parça yüksekliği ise 0,43mm olarak ölçülmüştür. Üst üste binme olayının yaşanmadığı 3 ve 4 nolu numunelerde ise yükseklik nispeten daha düşük çıkmıştır.

Üst üste binme durumunun yaşandığı ilk iki numunede yüksekliklerin büyük çıkmasının nedeni olarak oluşturulan yığının düzgün bir şekilde yığın aralarındaki boşluğu doldurarak bir hacim oluşturması, bir sonraki katmandaki işlemler için düzgün bir altlık vazifesi görmesi olarak görülebilir.

3 ve 4 nolu numunelerde ise daha karmaşık bir durum vardır. İlk olarak bütün numuneler paso genişliği hariç aynı parametreler uygulanarak oluşturulmuştur. Bundan dolayı A-A kesiti alındıktan sonra dağlanmış görüntülerde (Şekil 4.56) 3 ve 4 nolu numunelerde oluşturulan yığın kesitleri 1 ve 2 nolu numunelerinkinden daha büyük boyutlu olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak Bölüm 4.3.5'te değinilen ve Şekil 4.48 ile açıklanan durum gösterilebilir. Yani bir önceki oluşturulan eğrisel yüzey üzerine yapılan yığma işleminde eğrisel yüzeyin lazerle yapmış olduğu büyük yüzey alanı etkileşimi, bu alana bağlı olarak daha fazla miktarda yığılan toz miktarı nedenleri gösterilebilir.

3 ve 4 nolu numunelerdeki ikinci karmaşık durum ise bu numunelerde elde edilen yükseklik değerleri ile ilgilidir. Yeni yapılan yığın bir önceki oluşturulan yığın üzerine binme yapmadığına, o yığın ile temas dahi oluşmadığına göre, Deney 4.3 örneğindeki gibi yükseklik değerleri baz alınarak daha düşük çıkması gerekeceği beklenebilir.

Şekil 4.55 ve Şekil 4.56 incelenecek olursa 4 nolu numunede nispeten daha az olmak üzere 3 ve 4 nolu numunelerde oluşturulan yığınlar bir önceki oluşturulanlarla pek de

ilişkisiz sayılmaz. Özellikle 3 nolu numunede akışkan durumundaki eriyik 1 ve 2 nolu numunedekiler kadar olmasa da bir önceki oluşturulan yığın üzerine kadar gelmiş ve eriyiğin büyük kısmının aşağı doğru akışı engellenmiş olduğu görülmektedir. 4 nolu numunede ise yığınlar arasındaki mesafenin biraz daha fazla olduğu düşünüldüğünde bu etki biraz daha az olmuştur. Fakat diğer yandan beslenen toz miktarının yanı sıra bir önceki katmanın oluşturulması esnasında katılaşmış yapı üzerine düşen ve paso genişliğinin de arada mesafe bırakacak miktarda büyük olmasından dolayı iki yığın arasında oluşan boşluk ve girintili kısımlarda fazladan toz birikintisinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bunun neticesinde lazer ışınının etkisi esnasında fazladan toz yığma olayı gerçekleştiği ve bundan dolayı da yüksekliğin Deney 4.3'e nazaran daha yüksek çıktığı gözlenmiştir.

Yığınlar arasında oluşan boşluklar, oluşturulan parçanın yoğunluğunu belirleyen en önemli etkenlerdendir. Bu yüzden yüksek yoğunluklu parça elde etmek isteniyorsa yığınlar arasında, yığınların birleşme kısımlarında boşluk olmayacak şekilde oluşturulması gerekiyor. Bunu gerçekleştirebilmek için ise muhakkak yanyana oluşturulan ardışık yığınlar birbiri üzerine binecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu miktar boşluğun hiç olmayacağı ve oluşan üst yüzey karmaşıklığının minimum olacağı ölçüyü verecek kadar büyük olmalı, gereğinden fazla düzensizlik oluşturmayacak kadar da düşük olmalıdır.

Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde üst katmanda oluşan tane büyüklükleri ilk oluşan yığındakilerden nispeten büyük olmakta ve bu da parçanın mekanik özelliklerine etki ettiği yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları ile ortaya çıkmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kurulan deney seti ile çeşitli deneyler yapılmıştır.

Yapılan ilk deneyde lazer odak uzaklığı, nozul-altlık boşluğu, gaz debisi ve ilerleme hızları değişken olarak alınıp diğer parametreler sabit tutularak 24 adet numune üretilerek yığın genişliği, yığın yüksekliği ve yığın ağırlığı değerleri ölçülmüştür.

Sonuçlar üzerine Taguchi ve tepki yüzeyi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda parametrelerin yığın genişliğine, yüksekliğine ve ağırlığına yapmış oldukları etki miktarları belirlenmiş, minimum ölçülerde yığın imal edilebilmesi için parametrelerin olması gereken seviyeleri belirlenmiştir.

Analiz sonuçlarına göre şu yargılara varılmıştır;

✓ Varyans analizi sonucunda bütün ana faktörlerin yığın genişliği, yüksekliği ve ağırlığı sonuçlarına yüksek derecede etkisinin olduğu görülmüştür. Ana faktörlerin haricinde başta boşluk-gaz debisi ve odak uzaklığı-gaz debisi olmak üzere odak uzaklığı-boşluk etkileşimli faktörlerin yığın genişliği ve yığın yüksekliği üzerine etkisinin olduğu görülmüştür. Ağırlık sonuçlarına ise ana faktölerin haricinde sadece boşluk-gaz debisi etkileşimli faktörünün çok yüksek olmayan bir oranda etkisinin olduğu görülmüştür.

✓ Gaz debisinin artması ile toz hızı da arttığından dolayı lazerle etkileşime giren tozların etkileşim zamanının azalmasından dolayı elde edilen yığın büyüklüğünde azalma olmasına, dolayısıyla yığın genişliğinin, yüksekliğin ve ağırlığın düşük olmasına neden olmaktadır.

✓ İlerleme hızının artması ile yine tozlarla ve altlıkla etkileşime giren lazerin etkileşim zamanın azalmasından dolayı yığın genişliği, yüksekliği ve ağırlığı sonuçları düşük olmaktadır.

✓ Boşluğun azalması ile yığın büyüklüğünün artmasındaki asıl nedeni yapılan yüksek hızlı kamera kayıtları ile daha iyi anlaşılmıştır. Saniyede 20.000 adet resim alınan yüksek hızlı kamera kayıtlarına göre boşluk miktarının azalması ile lazerin etki alanı içerisindeki tozlar nozulun yanal kısımlarında oluşan yüksek hızlı gaz akımının perdelemesi nedeniyle hapsolma olayı yaşamış bu yüzden yığın ölçüleri büyük çıkmıştır.

✓ Odak uzaklığının ilk seviyesinde elde edilen yığın genişliği genel olarak diğer seviyelerde elde edilen genişlik değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Yükseklik ve ağırlık sonuçları için ise odak uzaklığının ikinci seviyesi olan altlık üzerine temas eden uzaklıkta minimum spotun elde edildiği seviyede sonuçlar daha düşük çıkmıştır. Buradaki farklılık odak uzaklığının değişimi ile değişken duruma gelen lazer ışını huzmesine giren tozların lazerle etkileşimi ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

✓ Analiz sonuçlarının irdelenmesi neticesinde minimum yığın genişliğine sahip parça elde edilebilmesi için odak uzaklığının birinci seviyesi, boşluk, debi ve ilerleme hızının ise ikinci seviyesinin kullanılması gerektiği kanısına varılmıştır.

✓ Yapılan tepki yüzeyi analizlerinde deney faktörleriyle sonuçlar arasında yığın genişliği için lineer bir ilişki olduğu, yükseklik ve ağırlık sonuçları için ise lineer olmayan bir ilişki olduğu görülmüş, uydurulan modeller ise bu sonuçlara göre oluşturulmuştur.

Tek sıra halinde çok katmanlı ince bir yapının imal edilebilmesi için yapılan deneyde ise değişken olarak sadece paso derinliği parametresi seçilmiştir. Paso derinliği 0,05mm ile 0,15mm arasında olmak üzere 5 farklı kombinasyonda deney yapılmış ve numuneler imal edilmiştir.

Elde edilen numuneler gerek dış görünüş bakımından mikroskop altında incelenmiş, gerekse belirli kısımlarından kesitleri alınarak zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiş, dağlanarak her oluşturulan yığının oluşma davranışı hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Yapılan bu deneye göre şu şekilde sonuçlar alınmıştır;

✓ Paso derinlik değerleri arttıkça elde edilen yapının yüksekliği artmaktadır. Fakat buna rağmen tek başına elde edilen yığın geometrisi ve teorik hesaplar sonucunda elde edilmesi gereken yükseklikte parça elde edilememiş, beklenen ölçülerden çok düşük kalmıştır. Bu durumun yığınlar üst üste tek sıra halinde oluşturulduğu için bir üstteki yığın yapılırken eriyerek akışkan hale gelen malzemenin kenarlardan aşağı doğru hareketi sonucunda üst kısımda katılaşan malzeme miktarının oldukça sınırlı kalmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

✓ Elde edilen duvar şeklindeki yapının genişliklerine bakılacak olursa en alt kısımdan en üst kısma gidildikçe genişliğin kontrolsüz bir şekilde arttığı görülmüştür. Bunun da nedeni olarak yine aynı şekilde üst katmanlar oluşturulurken akışkan hale gelen malzemenin kenar kısımlardan aşağı doğru akışı olarak gösterilmiştir. Bu akış genişlik ölçüsünün kontrolsüz artmasının yanı sıra elde edilen yapının da düzensiz oluşmasına neden olmaktadır.

✓ Düz bir yüzeye sahip olan altlık yüzey üzerine oluşturulan yığının boyutsal büyüklükleri başka bir yığın üzerine oluşturulan yığının boyutundan daha küçük oluşmaktadır. Bir önceki basamakta oluşturulan yüzeyin pürüzlülüğünün yüksek olması, üzerinde tam olarak ergimemiş ama eriyik üzerine yapışmış tozların bulunmuş olması altlığın yüzey alanını artırmış dolayısıyla lazerin soğurma miktarını artırmış ve daha büyük yapıda yığınların oluşmasına yol açmıştır. Diğer yandan lazerin eğrisel bir yüzeye etki etmesi sonucunda yüzeyin açılımı baz alındığında daha büyük bir yüzey alana etki etmesi de bu durumun oluşmasına sebep olarak gösterilebilir.

Paso genişliği ve paso yüksekliği faktörlerinin parçanın oluşturulmasında oynadığı rolü tespit edebilmek için çok sıralı- tek katmanlı ve çok sıralı-çok katmanlı yapıda parçaların imal edildiği başka deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde; değişken olarak paso genişliği ele alınmış tek bir yığının genişliğinin 0,285mm olarak oluştuğu bir kombinasyonda 0,2 ile 0,35 arasında 4 farklı ölçüde paso genişliği değeri kullanılarak numuneler elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda şu sonuçlara varılmıştır;

✓ Paso genişliğinin azalması ile yan yana ardışık olarak yapılan yığınların birbirleri üzerine binme miktarları artmaktadır. Binme miktarları arttıkça pasolar arasındaki boşluklar azalmakta, dolayısıyla üst üste tekrarlanan işlemlerde oluşturulan yığınların seviyesi yüksek olmaktadır. Binme miktarlarının azaldığı büyük paso genişliklerinin uygulandığı numunelerde toplam yükseklik miktarı düşmektedir. Fakat bu düşüş tek sıra halinde oluşturulan numunelerdeki kadar büyük miktarda olmamıştır. Bunun nedeni olarak ise büyük paso miktarı olarak sözü edilen miktar 0,3 ve 0,35mmdir. Yığın genişliğinin yaklaşık olarak 0,285mm olduğu göz önünde bulundurulursa yapı arasında boşluk oluşacağı muhakkak ama bu boşluğa ve bazı girintili kısımlara da bir önceki işlemde düşen tozların birikmesi neticesinde yığılan toz miktarı artmaktadır.

✓ Yığınlar arasında oluşan boşlukların, yoğunluğu etkileyen en önemli unsurlardan biri olduğundan dolayı yüksek yoğunluklu parçalar elde edebilmek için pasolar arasında boşluk bırakmayacak kadar küçük miktarda paso genişlikleri, oluşturulacak yapının geometrisini engellemeyecek kadar da büyük paso genişlikleri uygulanmalıdır.

Yığınlar üzerinde çeşitli kesitler alınarak yapılan mikroyapı incelemelerinde genel olarak şu sonuçlara varılmıştır;

✓ A-A kesitinde altlığa yakın kısımlarda altlığa doğru kolonsal taneler, altlığa uzak kısımlarda ise düşük soğuma miktarından dolayı hem daha büyük hem de eş eksenli

taneler oluşmuştur. Yüksek ilerleme hızı ile elde edilen numunede kolonsal yapıların ağırlıklı olarak bulunduğu gözlenmiştir.

✓ B-B kesitinde yapılan incelemede ise kolonsal yapılar her iki numunede de ağırlıklı olarak bulunmakta ve altlıkla sınırlı kalmadığı görülmektedir. Düşük ilerleme hızı ile oluşturulan numunedeki kolonsal tanecikler yüksek ilerleme hızınınkine oranla lazerin ilerleme yönüne doğru daha yatık oluşmuştur. Bunun nedeni olarak ise düşük ilerleme hızında lazer ışını doğrultusundaki asıl altlık yüksek ilerleme hızına oranla daha fazla miktarda enerjiye maruz kaldığı için katılaşmakta olan bölgeden ısı kaybı az önce katılaşmış yığın üzerinden yaşandığı kanısına varılmıştır. Her iki ilerleme hızı ile elde edilen numunelerin ortak özelliği ise yığının alt kısmında kolonsal taneciklerin yatayla daha büyük açıda, üst kısımlarda ise daha küçük açıda oluşmasıdır.

✓ C-C kesitinde ise düşük ilerleme hızı ile oluşturulan yığında daha uzun kolonsal tanecikler, yüksek ilerleme hızı ile oluşturulan yığında ise hem daha kısa kolonsal tanecikler hem de eş eksenli taneciklerin oluştuğu görülmüştür. Bunun nedeni ise B-B kesitinde yüksek ilerleme hızı ile oluşturulan yığının tanelerinin daha dik konumda olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Mikroyapı üzerinde yapılan incelemeleri mikrosertlik ölçümleri de desteklemektedir. Yığınların altlığa yakın olan kısımlarında oluşan sertlikler hızlı soğumadan dolayı daha yüksek çıkmış, altlığa uzak olan kısımlarında ise daha düşük çıkmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında lazerli yığma prosesi sistemi geliştirilerek proses optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Deney setinin kurulumu lazer, optik, mekanik ve elektronik gibi çok çeşitli disiplinlerle ilgilenmeyi gerektirmektedir. Bünyesinde yüksek güçlü lazer, çeşitli mercekler ve fiber optik kablo, CNC tezgahı ve çeşitli ekipmanların otomatik kontrolü, soygaz besleme ünitesi, toz malzeme besleme ünitesi ve özgün tasarıma sahip karmaşık yapılı nozul gibi çeşitli ekipmanları barındırmaktadır. Deney düzeneğinin kurulması aşamasında sürekli olarak daha iyi bir duruma gelmesi için gerek mekanik gerekse optik sistem çeşitli iyileştirmelerden geçirilmiştir.

Hem lazerli bir proses olması hem de toz malzemelerin proses bölgesine eşzamanlı bir şekilde beslenmesinden dolayı çok karmaşık bir yapıya sahip olan lazerli yığma prosesinde elde edilen parçaların özelliklerini etkileyen lazer gücü, toz besleme miktarı, toz hızı, lazer ışını odak uzaklığı ve spot çapı, ilerleme miktarı, gaz debisi, nozul açıklığı, paso derinliği, paso genişliği, yüzey değişkenleri, malzeme tipi, toz partikül boyutları ve şekli gibi çok sayıda değişken mevcuttur. Bu çalışmada özellikle lazer ışını spot çapı, odak uzaklığı, toz besleme miktarı, taşıyıcı gaz debisi, nozul açıklığı, ilerleme hızı paso derinliği ve genişliği gibi sınırlı sayıda değişken üzerinde bazı deneyler yapılmıştır.

Proses optimizasyonu çalışmasında odak uzaklığı, taşıyıcı gaz debisi, nozul açıklığı ve ilerleme hızından oluşan çeşitli kombinasyonlarda deneysel tasarım teknikleri kullanılarak çeşitli deneyler yapılmış ve sonuçları üzerinde çeşitli istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda minimum boyuta sahip parçaların imal edilebilmesi hedeflenmiş ve seçilen parametreler arasında yüksek orandaki taşıyıcı gaz debisinin,

büyük nozul açıklığının ve yüksek ilerleme hızlarının istenilen sonucu veren faktör seviyeleri olduğu görülmüştür. Genel olarak yüksek ilerleme hızlarında lazer ışını yoğunluğunun daha düşük olduğu büyük spot çaplı kombinasyonlarda, düşük ilerleme hızlarında ise lazer ışını yoğunluğunun en büyük olduğu minimum spot büyüklüğü seviyesine sahip kombinasyonlarla en küçük yığın büyüklüklerinin oluştuğu ortaya çıkarılmıştır.

Farklı özelliklerde imal edilen parçalar üzerinde çeşitli kesitler alınarak çeşitli boyutsal, metalografik ve mekanik gözlem ve incelemeler yapılmıştır.

Metalografik incelemelerde parçalardaki tane oluşumu çeşitli kesitlerden gözlenmiştir. Buna göre altlığa yakın kısımlarda küçük ve kolonsal tane yapıları, uzak kısımlarda ise büyük ve eş eksenli tane yapılarının oluştuğu gözlenmiştir.

Diğer yandan kolonsal tanelerin altlığa uzak bölgelerde lazerin ilerleme yönüne paralel doğrultuda, altlığa yakın bölgelerde ise altlığa paralel doğrultuda oluştuğu gözlenmiştir.

Altlığa yakın bölgelerin sertliği altlığa uzak bölgelere nazaran yüksek oranda soğuma hızının etkisi ile daha fazla çıkmıştır.

Deney düzeneği ile elde edilen bazı parça örneklerinin resimleri Ekler'de verilmiştir.

6.2. Öneriler

Özellikle küçük boyutlu tozların beslenmesi problemli olmakta, toz besleyici tasarımında tozların rahatlıkla taşınması ve tıkanıklığa yol açmaması için nem, statik elektrik, manyetiklenme ve oksitlenmeyi önleyici tedbirler alınmalıdır.

Hedeflenen yükseklik ve genişlikte yığınlar elde edilmesi için farklı lazer gücü, toz büyüklüğü, toz besleme miktarı ve ilerleme hızı faktörlerinden oluşan

kombinasyonlar ile daha fazla deneysel çalışmalar yapılması alternatifli çözümler sunacaktır.

Üst üste oluşturulan yığınların diziliş şekli bakımından maksimum yoğunluk hedeflenerek farklı stratejiler üzerinde durulmalıdır.

Sürekli olarak basınçlı gaz yardımı ile toz beslenen eriyik çok hızlı bir şekilde farklı şartlarla karşılaştığı için yüksek hızlı kameralarla kayıt yapılarak deneysel çalışmaları desteklemek olayın daha iyi anlaşılarak yönlendirilmesi sağlanabilir.

Lazerli yığma işleminde prosesin doğasından kaynaklandığı şekliyle yönlendirilmiş katılaşma yaşandığı söylenebilir. İlerleme hızı ve enerji miktarı kontrol edilerek, hatta katılaşmanın dışarıdan bir soğutma ünitesi ile yönlendirilmesi ile istenilen yönde ve kalitede içyapılara sahip parçalar elde edilebilir.

Yapılan çalışmalarda termokupl yardımı ile sıcaklık ölçme için bazı çalışmalar yapılmış, prosesin doğasından kaynaklanan nedenlerle başarılı sonuçlar alınamamıştır. Termal kamera veya pirometrelerle sıcaklık ölçüm işlemi deneysel çalışmalara katkı sağlayabilir.

Daha büyük numune elde edilmesi üzerine çalışılarak imal edilen parçalar çekme, basma ve eğme gibi çeşitli mekanik testlere tabi tutularak mekanik davranışları daha geniş perfpektifte ele alınmalı ve proseste iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.

Sistemin sağladığı avantajlardan olan hibrid yapıda parçalar imal edilebilmesi için farklı malzemeler üzerinde çalışılmalı, istenilen ölçülerde düzgün bir yapıda yığın elde edilebilmesi ve malzemelerin birbirlerine yapışmasının başarılabilmesi için lazer gücü, ilerleme hızı, toz malzeme besleme miktarı ve taşıyıcı gaz debisi gibi faktörlerle çeşitli kombinasyonlarda çeşitli deneysel çalışamalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1) Nakagawa T., "Modern Manufacturing", Mechanical Engieering Handbook, chapter 13,Kreith F, ***CRC Press LLC***, 107-116, (1999)

2) Ermurat M, "Hızlı Prototip ve Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü-Fen Bilimleri Enstitüsü***, Gebze, 17-28,110, (2002)

3) Hull C, Feygin M, Baron Y, Sanders R, Sachs E, Lightman A, Wohlers T, "Rapid prototyping: current technology and future potential", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 11-19, (1995)

4) Wohlers T., "Future potential of rapid prototyping and manufacturing around the world", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 4-10, (1995)

5) Ermurat M., Erzincanli F., "The Role of Rapid Prototyping Technologies in CIM", ***2nd International conference on Responsive Manufacturing***, University of Gaziantep -in cooperation with Nottingham University, 142-148, (2002)

6) Erzincanli F. ve Ermurat M. "Comparison of the Direct Metal Laser Fabrication Technologies", **2nd International conference on Responsive Manufacturing,** University of Gaziantep, 131-135, (2002)

7) Neğiş E, 1997, *İmalatta Mükemmele Doğru; Otoinşa Teknolojileri* [online], TurkCADCAM.net Tasarım ve imalat teknolojileri portalı, www.turkcadcam.net /rapor /otoinsa/index.html, (**Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2008**)

8) Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S, "Laser Cladding", 3-95, ***CRC Press LLC***, (2005)

9) Hulls C, 1997, *What is Stereolithography?* [online], www.3dsystems.com/ products/sla/index.asp, (**Ziyaret Tarihi: Aralık 2008**)

10) Langer H.J, *Metal Laser Sintering* [online], www.eos.info/en/products/metal-laser-sintering.html, (**Ziyaret Tarihi: Aralık 2008**)

11) Concept Laser, LaserCUSING *Fusion of single-component metallic powder materials* [online], www.Concept-Laser.de, (**Ziyaret Tarihi: Aralık 2008**)

12) Mcp Group, MCP Rapid Tooling kataloğu [online] www.micromanu.com/library /1/MCP Rapid Tooling.pdf, **(Ziyaret Tarihi: Mayıs 2009)**

13) Hutfless J, "Trumpf Laserformen – Anwendung generativer Laserverfahren für den Werkzeug- und Formenbau", ***Rapid Technologie Journal***, Issue 2, (2005)

14) Chua C.K., Leong K.F. and Lim C.S, "Rapid Prototyping, Principles and Applications", 2nd ed, ***World Scientific***, 179-180, (2003)

15) Kathuria Y.P, "Microstructuring by selective laser sintering of metallic powder", ***Surface & Coatings Technology***, 116-119, pp 643-647, (1999)

16) Klocke F, Celiker T, Song Y.A, "Rapid Metal Tooling", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 32-42, (1995)

17) Gibson I and Dongping S, "Material properties and fabtication parameters in selective laser sintering process", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 129-136, (1997)

18) Schueren B.V and Kruth J.P, "Powder deposition in selective metal powder sintering", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 23-31, (1995)

19) Beaman J.J, Barlow J.W., Bourell D.L, Crawford R.H, Marcus H.L., McAlea K.P, "Solid Freeform Fabrication: A new direction in manufacturing", ***Kluwer Academic Publishers***, 131-141 (1997)

20) Agarwala M, Bourell D, Beaman J, Marcus H, Barlow J, "Post-processing of selective laser sintered metal parts", ***Rapid Prototyping Journal***, pp 36-44, (1995)

21) Noguchi H., and Nakagawa T., "Manufacturing of high precision forming tool transferred from laser stereolithography models by powder casting method", ***Computers in Industry*** 39, pp 55-60, (1999)

22) Mazumder J, Dutta D, Kikutchi N and Bhosh A, "Closed loop direct metal deposition: art to part", ***Optics and Lasers in Engineering***, 34, pp 397-414, (2000)

23) Mazumder J, *Direct Metal Deposition*[online], www.pomgroup.com, (**Ziyaret Tarihi: Aralık 2008**)

24) Koch J.L. and Mazumder J., "Rapid Prototyping By Laser Cladding", Laser Material Processing, ***ICALEO 1993***, T.D. Mccay, A. Matsunawa, ve H.Hugel, pp.556-557, Laser Institute of America, (1993)

25) Murphy M.L., Steen W.M., and Lee C., "A novel prototyping technique fort he manufacture of metallic components", ***ICALEO 1994***, pp.31-40. Laser Institute of America, (1994)

26) Xue L. and Islam M., "Free-form laser consolidation for production functional metallic components", ***ICALEO 1998***, pp.15-24, Laser Institute of America, (1998)

27) Duley W.W, "Laser Welding", 67-73, ***John Wiley & Sons Inc***, (1998)

28) Shao T. M., Lin X. C., Zhou M, "Absorption of some powder materials to YAG laser", ***Science in China*** (A Serisi), Vol 44, (2001)

29) Steen W.M, "Laser Material Processing", ***Springer-Verlag London Limited***, (2001)

30) Niemz M.H., “Laser-Tissue Interactions”, ***Springer-Verlag Berlin Heidelberg***, 10-41, (2004)

31) Schwoerer H, Magill J, Beleites B, “Lasers and Nuclei”, ***Springer, Berlin Heidelberg***, 8-22, (2006)

32) Black I, Laser cutting speeds for ceramic tile: a theoretical empirical Comparison, ***Optics & Laser Technology*** 30, 95-101, (1998)

33) Fischer P., Romano V, Weber H.P, Karapatis N.P, Boillat E, Glardon R, “Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source”, ***Acta Materialia 51*** 1651–1662, (2003)

34) Xie J and Kar A, “Mathematical modeling of melting during laser materials processing”, ***J. Appl. Physics***, 81 (7), (1997)

35) Ashby M.F., Jones D. R. H., “Engineering Materials 2-An Introduction to microstructures, Processing and Design”,2nd. Edition, ***Butterworth-Heinemann***, 18-195, (1998)

36) H.J. Niu and I.T.H. Chang, Selective Laser Sintering Of Gas And Water Atomized High Speed Steel Powders, ***Scripta Materialia***, Vol. 41, No. 1, pp. 25–30, (1999)

37) Jouvard J-M, Grevey D F, Lemoine F and Vannes A. B., “Continuous wave Nd :YAG laser cladding modelling: a physical study of track creation during low power processing” ***J. Laser Appl***. 9, 43–50, (1997)

38) Pinkerton A.J and Li L, “Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances”, ***J. Phys. D: Appl. Phys***. 37, 1885–1895, (2004)

39) Glardonl R., Karapatisl N., Romanoz V., “Influence of Nd:YAG Parameters on the Selective Laser Sintering of Metallic Powders”, ***CIRP Annals - Manufacturing Technology*** Volume 50, Issue 1, Pages 133-136, (2001)

40) Tolochko N.K, Laoui T., Khlopkov Y.V., Mozzharov S.E, Titov V.I. ve Ignatiev M.B., “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering”, ***Rapid Prototyping Journal***, Vol 6-3, p155-160, (2000)

41) Howard A. Kuhn, “Powder Forging”, ***Metal Powder Industries Federation, New Jersey***, (1990)

42) Gedda H, Kaplan A, Powell J, “Melt-Solid Interactions in Laser Cladding And Laser Casting”, ***Metallurgical And Materials Transactıons B*** Volume 36b, 683-689, (2005)

43) Oliveira U, Ocelik V, Hosson J.T.M,D “Analysis of coaxial laser cladding processing conditions”, ***Surface & Coatings Technology*** 197 127– 136, (2005)

44) Han L., Liou F.W., Phatak K.M., "Modeling Of Laser Cladding With Powder Injection", ***Metallurgical And Materials Transactions B***, Volume 35, Number 6, 1139-1150, (2004),

45) Liu J, Li L., Zhang Y., Xie X., "Attenuation Of Laser Power Of A Focused Gaussian Beam During Interaction Between A Laser And Powder İn Coaxial Laser Cladding", ***J. Phys. D: Appl. Phys***. 38, 1546–1550, (2005)

46) Schneider M, "Laser cladding with powder", ***Doktora* Tezi**, University of Twente, The Netherlands, (1998)

47) Ion J. C, "Laser Processing of Engineering Materials", ***Butterworth-Heinemann* Ltd** , ISBN 0750660791, (2005)

48) Koechner W., "Solid-State Laser Engineering", ***Springer Science Business Media Inc,*** 3-4, (2006)

49) Hitz B, Ewing J J, Hecht J, "Introduction to Laser Technology", ***Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc***,104-109, (2001)

50) Williams J.D. and Deckard C., "***Advences in modeling the effects of selected parameters on the SLS process", Rapid Prototyping Journal***, V4 N2, pp 90-100, (1998)

51) Hodgson N, Weber H, "Laser Resonators and Beam Propagation", ***Springer Science Business***, 519 ve 720, Media, Inc, (2005)

52) Fathi A, Toyserkani E, Khajepour A ve Durali M, "Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition", ***J. Phys. D: Appl. Phys***. 39 2613–2623, (2006)

53) Jeng J. Y.and Lin M.C., "Mold Fabrication And Modification Using Hybrid Processes Of Selective Laser Cladding And Milling", ***Journal Of Materials Processing Technology*** 110, 98-103, (2001)

54) Lin J. and Hwang B.C., "Coaxial laser cladding on an inclined substrate", ***Optics & Laser Technology 31***, pp 571-578, (1999)

55) Colaco R, Costa L, Guerra R and Vilar R, "A simple correlation between the geometry of laser cladding tracks and process parameters" ***NATO Advanced Study Institute Conf. on Laser Processing***: Surface Treatment and Film Deposition (NATO ASI Series, Series E) vol 307, ed J Mazumder et al, Portugal, (1994)

56) Yellup J M, "Laser cladding using the powder blowing technique", ***Surf. Coat. Technology***. 71 121–8, (1995)

57) Lin J. and Steen W.M., "An in-process method for the inverse estimation of the powder catchment efficiency during laser cladding", ***Optics & Laser Technology 30,*** pp 77-84, (1998)

58) Subramanian K., Vail N., Barlow J., Marcus H.,"Selective laser sintering of alumina with polymer binders", ***Rapid Prototyping Journal***, V1 N2, pp24-35, (1995)

59) Yevko V., Park C.B:, Zak G., Coyle T.W. and Benhabib B., "Cladding formation in laser-beam fusion of metal powder", ***Rapid Prototyping Journal***, V4 N4, pp 168-184, (1998)

60) Picasso M, Marsdan CF, Wangniere JD, Frenk A, Rappaz M. "A simple but realistic model for laser cladding", ***Metall Mater Trans B***, 25(2), pp 281–91, (1998)

61) Picasso M. and Hoadley A.F.A., "Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool", ***Int J Numer Methods Heat Fluid Flow***, 4 pp 61–83, (1994)

62) Toyserkani E, Khajepour A, Corbin A, "3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process", ***Optics and Lasers in Engineering 41,*** 849–867, (2004)

63) Lin J, "A simple model of powder catchment in coaxial laser cladding", ***Optics & Laser Technology 31,*** *pp* 233-238, (1999)

64) Abe F, Osakada K, Shiomi M, Uematsu K and Matsumoto M, "The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting", ***Journal of Materials Processing Technology*** 111, pp 210-213, (2001)

65) Agarwala M, Bourell D, Beaman J, Marcus H, Barlow J, "Direct selective laser sintering of metals", ***Rapid Prototyping Journal***, V1, N1,pp 26-36, (1995)

66) König W., Çeliker T., and Song Y.A., "Rapid Metal Prototyping", ***Proceedings of the third european conference on rapid prototyping and manufacturing***, pp 245-256, (1994)

67) Shiomi M., Yoshidome A., Abe F. And Osakada K., "Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders", ***Int. J. of Machine Tools & Manufacture*** 39, pp 237-252, (1999)

68) Das S., Fuesting T.P., Danyo G., Brown L.E., Beaman J.J, Bourell D.L., "Direct laser fabrication of superalloy cermet abrasive turbine blade tips", ***Materials and Design*** 21 pp 63-73 (2000)

69) Wurikaixi A, Wanhua Z, Bingheng L, Yiping T., "Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping", ***Rapid Prototyping Journal***, 12/3, pp 165-172, (2006)

70) Pinkerton A.J, Li L., "The behaviour of water and gas atomised tool steel powders in coaxial laser freeform fabrication", ***Thin Solid films*** 453-454, pp 600-605, (2004)

71) Greenhut V.A., "Materials-Mechanical Engineering Handbook", Chapter 12, Kreith F, ***CRC Press LLC***,6-19, (1999)

72 Ashby M.F., Jones D. R. H., “Engineering Materials 1-An Introduction to their properties and Applications”,2nd. Edition, ***Butterworth-Heinemann***,197-208, (1996)

73) Wyatt, L.M., “Materials, Properties and Selection - Mechanical Engineer’s Reference Book”, Chapter 7, Smith E.H.,Twelfth Edition, ***Butterworth-Heinemann***, 5-55, (1994)

74) Gingu O, Mangra M,Orban R.L., “In-situ production of Al/SiCp composite by laser deposition technology”, ***Journal of Materials Processing Technology*** 89-90, pp 187-190 (1999)

75) Kathuria Y.P:, “Laser cladding process: a sutdy using stationary and scanning CO_2 laser beams”, ***Surface and Coatings Technology*** 97, pp 442-447, (1997)

76) Bezençon C, Schnell A,Kurz W, “Epitaxial deposition of MCrAlY coatings on a Ni-base superalloy by laser cladding”, ***Scripta Materialia*** 49, pp 705–709, (2003)

77) Postacıoğlu N, Kapadia P, Downden J, “A theoretical model of thermocapillary flows in laser welding”, ***J. Physics D: Applied Physics***, 24, (1991)

78) Lewis G.K. and Schlienger E., “Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition”, ***Materials and Design***, Vol.21, pp.417-423, (2000)

79) Pei Y.T. and Hosson J.T.M.D, “Producing functionally graded coatings by laser powder cladding”, ***JOM***, vol. 52, no.1, pp 641-647, (2000)

80) Ensz M.T. and Griffith M.L., “Critical issues for fucntionally graded material deposition by laser engineered net shaping (LENS)”, ***MPIF Laser Metal Deposition Conference***, (2002)

81) Ermurat M, Erzincanlı F, Usta M, Uzman İ, Ecevit N, “Laser Assisted Metal Deposition Systems”, ***The 12th International Conference on Machine Design and Production***, 05 - 08 September, Turkey, (2006)

82) Islam M.U., Xue L., McGregor G., “Process for manufacturing or repairing turbine engine or compressor components”, ***ABD Patent***, patent no 6269540, (2001)

83) Gaumann M, Rusterholz H, Baumann R, Wagniere D.J., Kurz W, “Single crystal turbine components repaired by epitaxial laser metal forming”, ***Materials for Advanced Powder Engineering***, V 1479, pp 1-6, (1998)

84) Li X.C., Golnas A., Prinz F., “Shape deposition manufacturing of smart metallic structures with embedded sensors”, ***SPIE’s 7th international symposium on Smart Strcutures and Materials***, California, (2000)

85) Konno S., “Solid-State Lasers and Applications”, Ed Sennaroglu A., ***Taylor&Francis Group, CRC Press***, 235-243, (2007)

86) Migliore L., “Laser Materials Processing”, ***Marcel Deccer Inc,*** **(**1996)

87) Crisp J, “Introduction to fiber optics”, 2nd ed, ***Butterworth-Heinemann***, 11-16, 22-35, (2001)

88) Elliott B and Gilmore M, “Fiber optic cabling”, 2nd ed, ***Butterworth-Heinemann***,11-23, (2002)

89) Melles Griot, Melles Griot Optics Guide [online], http://www.mellesgriot.com/, **(Ziyaret tarihi: Aralık 2008)**

90) Cvilaser, Ürün kataloğu [online], http://www.cvilaser.com, **(Ziyaret tarihi: Nisan 2009)**

91) Fiber Optik Kataloğu, BFL22-550, www.thorlabs.com/catalogPages/1095.pdf, **(Ziyaret Tarihi: Aralık 2008)**

92) Saleh, Bahaa E. A. and Teich, Malvin C, “Fundamentals of Photonics”. ***New York: John Wiley & Sons***. *ISBN 0-471-83965-5*. Chapter 3, "Beam Optics," pp. 80–107., (1991)

93) Yao Y.L., Laser Machinin Processes Project Report, Laser Energy Description [online], www.mrl.columbia.edu\ntm\NTM\index.htm **(Ziyaret Tarihi: Aralık, 2007)**

94) JanosTechnology, www.janostech.com/drupal/knowledge_center/fs08_25.html, **(Ziyaret tarihi: Nisan 2009)**

95) Minitab yazılımı, Minitab Help ve Statguide, (2007)

96) Chande T. andMazumder J, “Composition Control In Laser Surface Alloying”, ***Metallurgical And Materials Transactions B***, Volume 14, Number 2, (1983)

97) Montgomery D.C., “Design and Analysis of Experiments”***, John Wiley&Sons***, (1997)

98) Miller D., Deckard C., Willams J., “Variable beam size SLS workstation and enhanced SLS model”. ***Rapid Prototyping Journal*** 3 1 (1997)

99) Song,Y.A., Park S., Chaoe S.W., “3D welding and milling: part II - optimization of the 3D welding process using an experimental design approach”, ***Int. J. of Machine Tools & Manuf***., (2005)

100) Yang H.J., Hwang P.J.and Lee S.H., “A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method”, ***Int. J. of Machine Tools & Manuf***, (2002)

101) Tarng Y.S.and Yang W.H., “Optimisation of the Weld Bead Geometry in Gas Tungsten Arc Welding by the Taguchi Method”, ***Adv. Manuf. Tech***, (1998)

102) Pan L.K., Wang C.C., Hsiao Y.C., Ho K.C., “Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis”, ***Optics & Laser Technology***, (2004)

103) Liao H. T. and Shie F., “Optimization on SLS of metallic powder via design of experiments”, ***Rapid Prototyping Journal***, (2007)

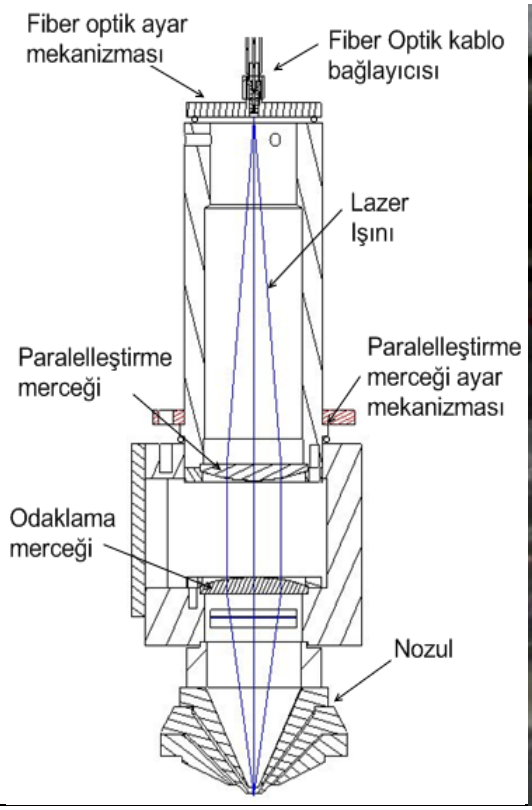
104) Onvubolu G. S., Dawim P.J. Oliveira C, Cardoso A, “Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search”, ***Optics & Laser Technology***, (2007)

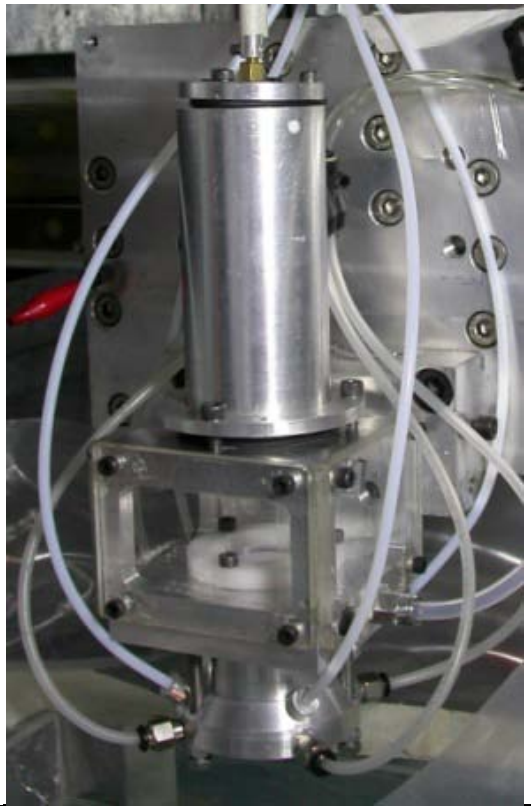
105) Chen Y.H., Tam S. C., Chen W.L., Zheng, H. Y., “Application of Taguchi Method in the optimizasyion of Laser Micro-Engravig of Photomasks”, ***International Journal of Materials & Product Technology***,(1996)

EKLER

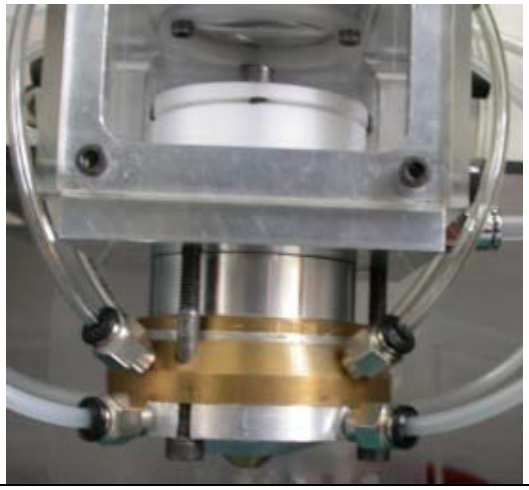
DENEY SETİNE AİT ÇEŞİTLİ GÖRÜNTÜLER

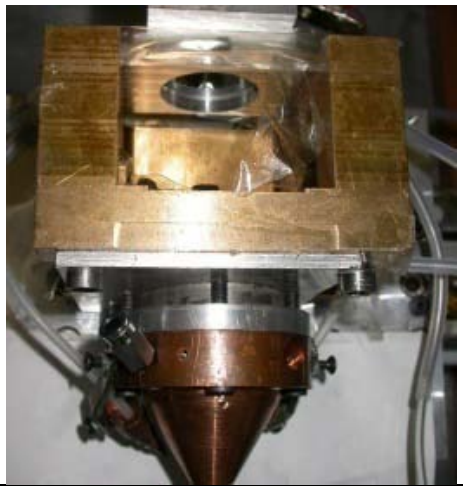
Nozula ait katı montaj modelinin kesit görüntüsü ve bir fotoğraf



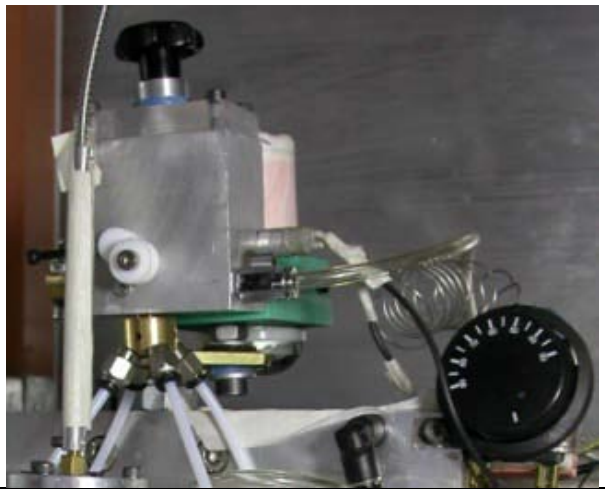


Eski Nozul Tasarımlarına ait fotoğraflar



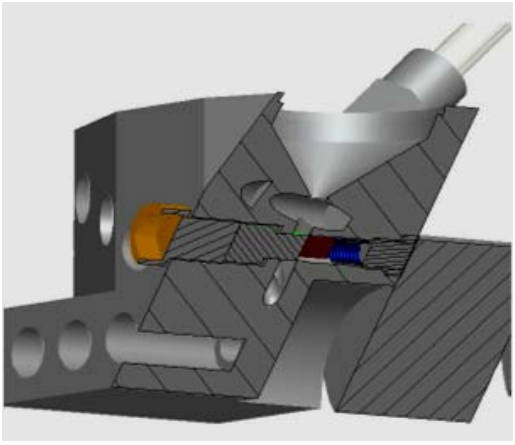


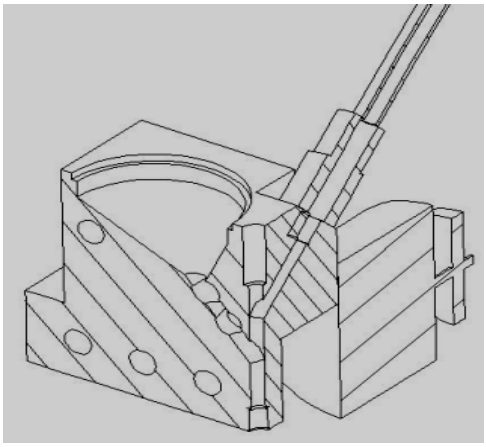
Çeşitli tasarımlara sahip toz besleyici ünitelerine ait fotoğraflar



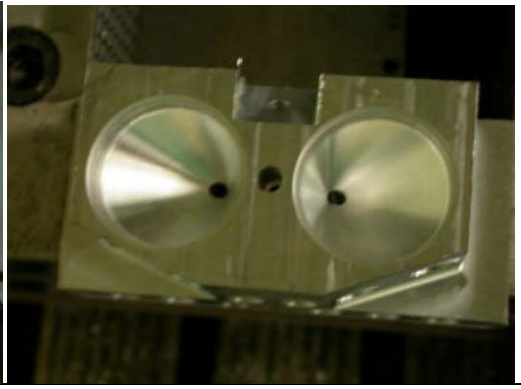


İki bileşenli nozulun 5 eksenli tezgâhta imalatına ait fotoğraf ve bazı kesit görüntüler

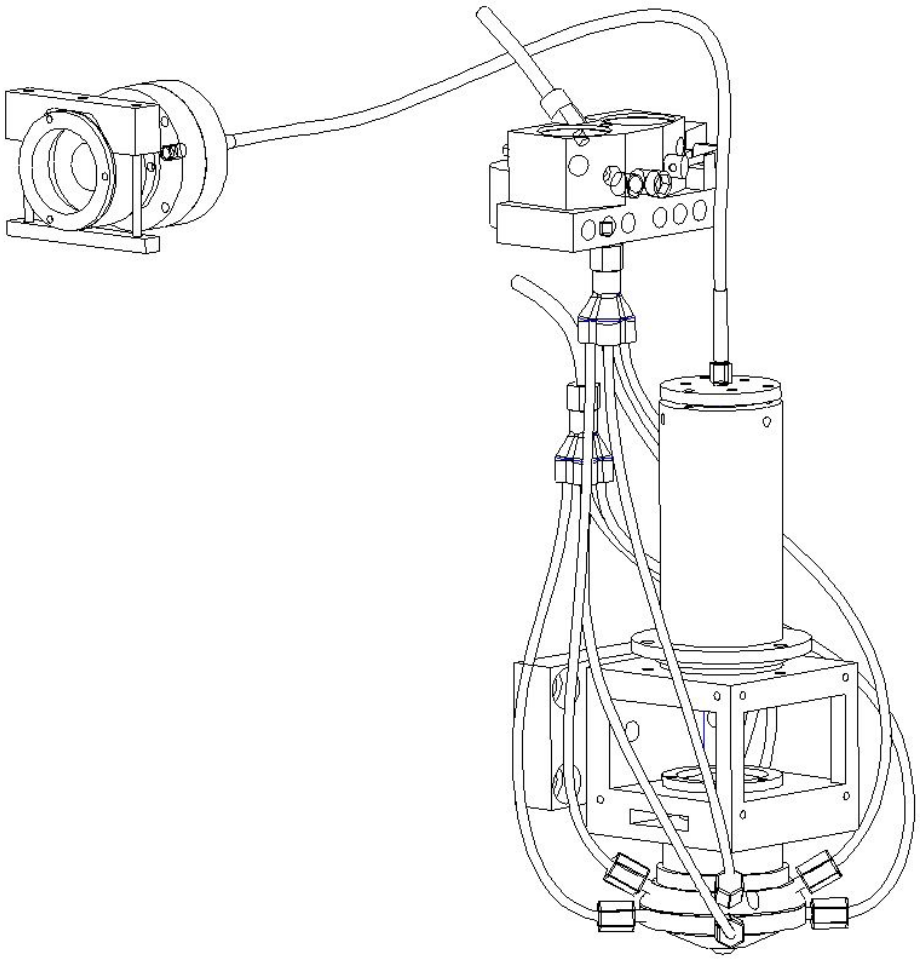


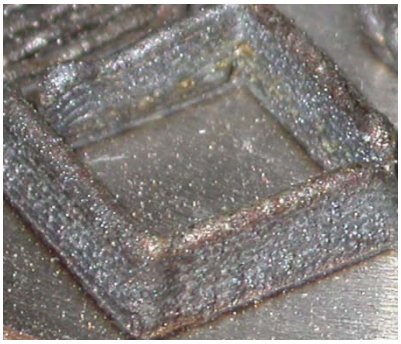
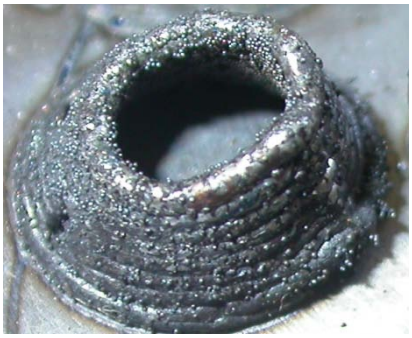
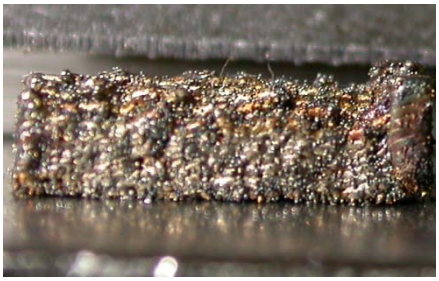






Gaz besleme sistemine ait resimler (sağ resim-kontrol sistemi)
 

Lazer-fiber bağlayıcısından nozula kadar olan kısmın katı model montaj görüntüsü


KURULAN DENEY DÜZENEĞİ İLE OLUŞTURULAN BAZI PARÇALAR	
	
	
	

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

1. M. Ermurat, F.Erzincanli, M. Usta, İ. Uzman, N. Ecevit, Laser Assisted Metal Deposition Systems, ***The 12th International Conference on Machine Design and Production, Special Session: Rapid Prototyping Processes and Applications***, ODTÜ, Kuşadası, (2006)

2. M.Ermurat, F.Erzincanli, İ.Uzman, Lazerli Direkt Metal Parça İmalatı Sistemleri, ***TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi***, Balıkesir Üniversitesi, (2006)

3. I.R. Karas, I. Baz, M. Ermurat , M. Selcuk, Usage of Cad/Cam Systems For Manufacturıng of Solid Relief Maps, ***5th Turkish-German Joint Geodetic Days***, Germany, (2006)

4. M.Ermurat, F.Erzincanli, İ. Uzman, New Generation Forming Process for Powder Metallurgy: Direct Metal Laser Fabrication, ***4. International Powder Metallurgy Symposium***, Sakarya University, (2005)

5. Erzincanli F., Ermurat M. Comparison of the Direct Metal Laser Fabrication Technologies, ***2nd International conference on Responsive Manufacturing***, University of Gaziantep, (2002)

6. Ermurat M., Erzincanli F. The Role of Rapid Prototyping Technologies in CIM, ***2nd International conference on Responsive Manufacturing***, University of Gaziantep, (2002)

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamladı.1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi bölümünü bitirdi. 2002 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği ana bilim dalından yüksek lisans derecesi aldı. Halen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.