

**LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN  
KESME ARALIĞI VE YÜZEY KALİTESİ ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Ufuk ÖNER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Mayıs 2008  
ANKARA**

Ufuk ÖNER tarafından hazırlanan LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME ARALIĞI VE YÜZEY KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ömer KELEŞ

Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İbrahim USLAN

Makina Mühendisliği

Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Necip CAMUŞÇU

Makina Mühendisliği

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer KELEŞ

Makina Mühendisliği

Gazi Üniversitesi

Tarih: 15/05/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ufuk ÖNER

**LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME  
ARALIĞI VE YÜZEY KALİTESİ ÜZERİNDEKİ  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Ufuk ÖNER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 2008**

**ÖZET**

Bu çalışmada, kesim işlemleri karbondioksit lazer tezgahında gerçekleştirilmiştir. İşleme parametreleri olarak; 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm iş parçası kalınlığı; 1000 W, 1200 W, 1400 W ve 1600 W lazer gücü; 200 mm/dak, 250 mm/dak, 300 mm/dak, ve 350 mm/dak, lazer kesme hızı; 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekansı seçilmiştir. Duty %100, Basınç 10 kg/cm<sup>2</sup>, Odak -2, Kafa 7,5", nozul çapı 1,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Yardımcı gaz olarak azot kullanılmıştır. Kesme işleminden sonra optik mikroskopta elde edilen görüntülerden kesme aralığı ölçümü, oyuk oluşumları ve ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü ölçümü yapılarak işleme parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Farklı parametrelerde yapılan lazer kesimleri sonucu yüksek güç ve yüksek hızlarda daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Kesme hızının (ilerleme) artmasıyla, kesme aralığının azaldığı görülmüştür. Kesilen malzemedeki kalınlık artışı kesme aralığını arttırmıştır.

**Bilim Kodu : 914.1.140**  
**Anahtar Kelimeler : Lazerle kesme, kesme kalitesi, kesme parametreleri**  
**Sayfa Adedi : 103**  
**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ömer KELEŞ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON  
THE KERF WIDTH AND SURFACE QUALITY  
DURING THE LASER CUTTING PROCESS  
(M.Sc. Thesis)**

**Ufuk ÖNER  
GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
May 2008**

**ABSTRACT**

In this study, carbondioxide laser machine is used for cutting processes. Processing parameters are selected as 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm working piece thickness, 1000 W, 1200 W, 1400 W ve 1600 W laser output power, 200 mm/min, 250 mm/min, 300 mm/min ve 350 mm/min laser cutting speed; 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 1500 Hz laser pulse frequency. Duty 100%, gas pressure 10 kg/cm<sup>2</sup>, Focus -2, Head 7,5", nozzle diameter 1,5 mm are constants. Nitrogen is used as assisting gas. After the cutting process, by making the measurements of kerf width, stria formation, and heat affected zone size on the pictures taken with optic microscope, the effect of processing parameters on cutting quality is investigated. As a result of the laser cutting with different parameters, at the high powers and high speeds better surfaces were obtained. With the increasing cutting speed (feed rate), the kerf width decreased. If the thickness of the cut material increases, the kerf width also increases.

**Science Code : 914.1.140  
Key Words : Laser cutting, quality of laser, laser parameter  
Page Number : 103  
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Ömer KELEŞ**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Ömer KELEŞ'e, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Doç. Dr. İbrahim USLAN'a ve Prof. Dr. Bekir Sami YILBAŞ'a, "LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME ARALIĞI VE YÜZEY KALİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı proje ile çalışmalarımı destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne, katkılarından dolayı Araş. Gör. Teyfik DEMİR'e, teknisyen Kadir YILMAZ'a, TAI "ilk kesim alanı" çalışanlarından Selman YÜKSEL'e, ham malzeme kontrol teknisyeni Mehmet Eymür'e ve Memiş Koluman'a, lazer ile kesme işlemlerinde ki yardımlarından dolayı Makine Mühendisi Fatih TUĞCU'ya ve her çalışmamda hep yanımda olan eşim Nurhan ÖNER'e teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                   |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                        | iv    |
| ABSTRACT .....                                                    | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                                    | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                 | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                         | xi    |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                           | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ.....                                           | xvi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                      | xviii |
| 1. GİRİŞ .....                                                    | 1     |
| 2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR .....                           | 3     |
| 3. LAZERİN TARİHÇESİ, TANIMI VE ÇEŞİTLERİ .....                   | 10    |
| 3.1. Giriş .....                                                  | 10    |
| 3.2. Lazerin Tarihçesi .....                                      | 10    |
| 3.3. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi .....                     | 12    |
| 3.4. Dalga Boyları ve Lazerin Yeri .....                          | 14    |
| 3.5. Lazer Çeşitleri.....                                         | 14    |
| 3.5.1. Optik pompalamalı katı lazerler .....                      | 14    |
| 3.5.2. Sıvı lazerler .....                                        | 15    |
| 3.5.3. Boyar maddeli lazerler .....                               | 15    |
| 3.5.4. Gaz lazerleri.....                                         | 16    |
| 3.5.5. Dinamik gaz lazerleri.....                                 | 16    |
| 3.5.6. Kimyasal lazerler.....                                     | 17    |
| 3.5.7. Yarı iletken lazerler .....                                | 17    |
| 3.5.8. Lazerlerin yükselteç ve osilatör olarak kullanılması ..... | 17    |

|                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.5.9. Kısa, güçlü darbeler üreten lazerler .....                               | 18           |
| 3.5.10. Ayarlanabilir lazerler .....                                            | 18           |
| 3.5.11. Katı lazerleri .....                                                    | 19           |
| 3.5.12. Gaz lazerleri .....                                                     | 19           |
| 3.5.13. Serbest elektronlu lazerler .....                                       | 21           |
| 3.6. Mod .....                                                                  | 21           |
| 3.7. Bazı Lazer Türlerinin Karşılaştırılması .....                              | 22           |
| 3.8. Lazerde Farklı Malzemelerin İşlenebilirliği .....                          | 22           |
| 3.8.1. Endüstriyel çelikler .....                                               | 22           |
| 3.8.2. Paslanmaz çelik .....                                                    | 24           |
| 3.8.3. Alüminyum .....                                                          | 25           |
| 3.8.4. Titanyum .....                                                           | 25           |
| 3.8.5. Bakır ve pirinç .....                                                    | 25           |
| 3.8.6. Sentetik malzemeler .....                                                | 26           |
| 3.8.7. Organik malzemeler .....                                                 | 26           |
| 3.9. Lazer Uygulama Alanları .....                                              | 26           |
| 4. LAZERLE KESME İŞLEMİ .....                                                   | 28           |
| 4.1. CO <sub>2</sub> Lazer Tezgahında Lazer Oluşumu ve Makinedeki İletimi ..... | 28           |
| 4.2. Lazerle Kesme İşlemi .....                                                 | 29           |
| 4.2.1. Kesme yöntemi .....                                                      | 29           |
| 4.2.2. Lazerle kesme işleminin avantajları ve dezavantajları .....              | 30           |
| 4.3. Lazerle Kesme Parametreleri .....                                          | 31           |
| 4.3.1. Lazer parametreleri .....                                                | 31           |
| 4.3.2. İş parçası parametreleri .....                                           | 32           |

|                                                                                | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 5. PASLANMAZ ÇELİK.....                                                        | 34           |
| 5.1. Giriş .....                                                               | 34           |
| 5.2. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması .....                              | 34           |
| 5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler .....                                        | 35           |
| 6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....                                                       | 38           |
| 6.1. Giriş .....                                                               | 38           |
| 6.2. Malzeme .....                                                             | 38           |
| 6.3. Lazer Tezgahı.....                                                        | 39           |
| 6.4. Yöntem .....                                                              | 40           |
| 6.5. Parametreler .....                                                        | 42           |
| 6.6. Uygulama .....                                                            | 43           |
| 7. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR.....                                          | 47           |
| 7.1. Lazer Kesme Kalitesi .....                                                | 47           |
| 7.2. Kesme Parametreleri .....                                                 | 48           |
| 7.3. Kesme Aralığının Parametrelere Bağlı Değişimi.....                        | 49           |
| 7.3.1. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi .....                | 49           |
| 7.3.2. Kesme aralığının lazer puls frekansı ve güce bağlı değişimi ...         | 62           |
| 7.3.3. Kesme aralığının malzeme kalınlığı ve güce bağlı değişimi.....          | 71           |
| 7.4. Dross Yüksekliğinin Parametrelere Bağlı Değişimi .....                    | 73           |
| 7.4.1. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi.....              | 73           |
| 7.4.2. Dross yüksekliğinin lazer puls frekansı ve<br>güce bağlı değişimi ..... | 77           |
| 7.4.3. Dross yüksekliğinin malzeme kalınlığı ve<br>güce bağlı değişimi .....   | 80           |

|                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 7.5. Lazer Kesiklerindeki ITAB'ın İncelenmesi.....                           | 82           |
| 7.6. Kenar Oyuklaşmalarının İncelenmesi .....                                | 91           |
| 8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                    | 92           |
| KAYNAKLAR .....                                                              | 94           |
| EKLER.....                                                                   | 97           |
| EK-1 Parametrelere bağlı olarak elde edilen kesme aralığı değerleri .....    | 98           |
| EK-2 Parametrelere bağlı olarak elde edilen dross yüksekliği değerleri ..... | 102          |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                | 103          |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                   | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması .....                | 22    |
| Çizelge 5.1. 304 paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri .....   | 37    |
| Çizelge 6.1. Kesme işleminde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi..... | 39    |
| Çizelge 6.2. Lazer tezgahı özellikleri.....                               | 39    |
| Çizelge 6.3. Her bir sac için parametre uygulama tablosu .....            | 42    |
| Çizelge 7.1. ITAB genişlikleri .....                                      | 90    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Enerji seviyesi diyagramı.....                                                                        | 12    |
| Şekil 3.2. Q anahtarlı yakut (Cr+3 Ruby) lazer.....                                                              | 13    |
| Şekil 3.3. Dalga boyları ve lazerin yeri [15] .....                                                              | 14    |
| Şekil 3.4. a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Yarı iletken lazer oluşumu .....                                   | 17    |
| Şekil 3.5. Lazer türlerinin K katsayısının karşılaştırılması [17] .....                                          | 21    |
| Şekil 4.1. Lazer ışınının tezgah üzerinde izlemiş olduğu yol.....                                                | 29    |
| Şekil 4.2. Lazerle kesme işlemi [20] .....                                                                       | 30    |
| Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları<br>(Ç.S. uygulanabilen alaşımlar) ..... | 35    |
| Şekil 6.1. Kullanılan malzeme ve kesik ölçüleri.....                                                             | 40    |
| Şekil 7.1. Tipik lazer kesme örneği şeması [26] .....                                                            | 48    |
| Şekil 7.2. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 100Hz) .....                              | 49    |
| Şekil 7.3. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 100Hz) .....                              | 50    |
| Şekil 7.4. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 100Hz) .....                              | 50    |
| Şekil 7.5. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 100Hz) .....                              | 51    |
| Şekil 7.6. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 500Hz) .....                              | 52    |
| Şekil 7.7. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 500Hz) .....                              | 52    |
| Şekil 7.8. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 500Hz) .....                              | 53    |
| Şekil 7.9. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 500Hz) .....                              | 53    |

| <b>Şekil</b>                                                                          | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 7.10. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 1000Hz) ..... | 54           |
| Şekil 7.11. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 1000Hz) ..... | 54           |
| Şekil 7.12. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 1000Hz) ..... | 55           |
| Şekil 7.13. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 1000Hz) ..... | 55           |
| Şekil 7.14. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 1500Hz) ..... | 56           |
| Şekil 7.15. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 1500Hz) ..... | 56           |
| Şekil 7.16. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm-1500Hz) .....  | 57           |
| Şekil 7.17. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 1500Hz) ..... | 57           |
| Şekil 7.18. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 200mm/dak) ..... | 62           |
| Şekil 7.19. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 200mm/dak) ..... | 63           |
| Şekil 7.20. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 200mm/dak) ..... | 63           |
| Şekil 7.21. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 200mm/dak) ..... | 64           |
| Şekil 7.22. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 250mm/dak) ..... | 65           |
| Şekil 7.23. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 250mm/dak) ..... | 65           |
| Şekil 7.24. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 250mm/dak) ..... | 66           |
| Şekil 7.25. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 250mm/dak) ..... | 66           |

| <b>Şekil</b>                                                                               | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 7.26. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 300mm/dak).....       | 67           |
| Şekil 7.27. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişim<br>(2mm, 300mm/dak).....        | 67           |
| Şekil 7.28. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 300mm/dak).....       | 68           |
| Şekil 7.29. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 300mm/dak).....       | 68           |
| Şekil 7.30. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 350mm/dak).....       | 69           |
| Şekil 7.31. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 350mm/dak).....       | 69           |
| Şekil 7.32. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 350mm/dak).....       | 70           |
| Şekil 7.33. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 350mm/dak).....       | 70           |
| Şekil 7.34. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1500 Hz, 350mm/dak) ..... | 71           |
| Şekil 7.35. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1000 Hz, 250mm/dak) ..... | 71           |
| Şekil 7.36. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1500 Hz, 250mm/dak) ..... | 72           |
| Şekil 7.37. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1000 Hz, 300mm/dak) ..... | 72           |
| Şekil 7.38. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 100Hz) .....    | 73           |
| Şekil 7.39. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 100Hz) .....    | 74           |
| Şekil 7.40. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 100Hz) .....    | 74           |
| Şekil 7.41. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 100Hz) .....    | 75           |

| <b>Şekil</b>                                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 7.42. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 500Hz) .....      | 75           |
| Şekil 7.43. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 500Hz) .....      | 76           |
| Şekil 7.44. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 500Hz) .....      | 76           |
| Şekil 7.45. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 500Hz) .....      | 77           |
| Şekil 7.46. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi<br>(1mm, 200mm/dak).....      | 78           |
| Şekil 7.47. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi<br>(2mm, 200mm/dak).....      | 78           |
| Şekil 7.48. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi<br>(3mm, 200mm/dak).....      | 79           |
| Şekil 7.49. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi<br>(4mm, 200mm/dak).....      | 79           |
| Şekil 7.50. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(100Hz, 200mm/dak) .....  | 80           |
| Şekil 7.51. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1500Hz, 350mm/dak) ..... | 80           |
| Şekil 7.52. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(1000Hz, 250mm/dak) ..... | 81           |
| Şekil 7.53. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi<br>(500Hz, 300mm/dak) .....  | 81           |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 2.1. Puls mod hız=1 m/dak frekans= 250 Hz [7] .....                           | 6     |
| Resim 2.2. Puls mod hız=3 m/dak frekans= 250 Hz [7] .....                           | 6     |
| Resim 2.3. CW mod hız=1 m/dak Güç=210 W [7] .....                                   | 7     |
| Resim 2.4. CW mod hız=6 m/dak Güç=900 W [7] .....                                   | 7     |
| Resim 2.5. Oksijene bağlı olarak geniş kesme aralığı [7] .....                      | 8     |
| Resim 3.1. Lazer çalışma prensibi[12] .....                                         | 12    |
| Resim 3.2. Lazer uygulamaları a)Açılı kesim b)Düz kesim<br>c)Oval kesim .....       | 27    |
| Resim 6.1. Kesme işleminden görünüm (a) ön yüz (b) arka yüz.....                    | 41    |
| Resim 6.2. Üst görünüş x50 büyütme<br>(1mm, 1000W, 200mm/dak, 100Hz) .....          | 43    |
| Resim 6.3. Yan görünüş x50 büyütme<br>( 1mm, 1000W, 200mm/dak, 100Hz) .....         | 44    |
| Resim 6.4. Kesik aralığının ölçümü.....                                             | 44    |
| Resim 6.5. Dross yüksekliği ölçümü .....                                            | 45    |
| Resim 6.6. Dross yüksekliği ölçümü için kullanılan optik ölçüm cihazı.....          | 46    |
| Resim 7.1. Kesik üst fotoğrafı 1mm, 1000W, 350mm/dak, 1000Hz<br>(x50 büyütme) ..... | 58    |
| Resim 7.2. Kesik üst fotoğrafı 1mm, 1600W, 200mm/dak, 1000Hz<br>(x50 büyütme) ..... | 58    |
| Resim 7.3. Kesik üst fotoğrafı 2mm, 1000W, 350mm/dak, 100Hz<br>(x50 büyütme) .....  | 59    |
| Resim 7.4. Kesik üst fotoğrafı 2mm, 1600W, 200mm/dak, 1500Hz<br>(x50 büyütme) ..... | 59    |
| Resim 7.5. Kesik üst fotoğrafı 3mm, 1000W, 300mm/dak, 1500Hz<br>(x50 büyütme) ..... | 60    |

| <b>Resim</b>                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 7.6. Kesik üst fotoğrafı 3mm, 1600W, 200mm/dak, 1500Hz<br>(x50 büyütme) ..... | 60           |
| Resim 7.7. Kesik üst fotoğrafı 4mm, 1600W, 300mm/dak, 500Hz<br>(x50 büyütme) .....  | 61           |
| Resim 7.8. Kesik üst fotoğrafı 4mm, 1600W, 250mm/dak, 100Hz<br>(x50 büyütme) .....  | 61           |
| Resim 7.9. ITAB 1000x büyütme (3mm,1000W, 200mm/dak, 500Hz).....                    | 83           |
| Resim 7.10. ITAB 500x büyütme (3mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz).....                   | 83           |
| Resim 7.11. ITAB 1000x büyütme (3mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz).....                  | 84           |
| Resim 7.12. ITAB 500x büyütme (3mm, 1000 W, 350mm/dak, 1500Hz).....                 | 84           |
| Resim 7.13. ITAB 1000x büyütme (3mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz)....                  | 85           |
| Resim 7.14. ITAB 500x büyütme (3mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz).....                  | 85           |
| Resim 7.15. ITAB 1000x büyütme (3mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz)....                  | 86           |
| Resim 7.16. ITAB 100x büyütme (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz).....                   | 86           |
| Resim 7.17. ITAB 500x büyütme (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz).....                   | 87           |
| Resim 7.18. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz).....                  | 87           |
| Resim 7.19. ITAB 500x büyütme (4mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz).....                   | 88           |
| Resim 7.20. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz).....                  | 88           |
| Resim 7.21. ITAB 500x büyütme (4mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz).....                  | 89           |
| Resim 7.22. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz)....                  | 89           |
| Resim 7.23. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz)....                  | 90           |
| Resim 7.24. 50x büyütme 1 mm (kesik yüzeyi).....                                    | 91           |
| Resim 7.25. 50x büyütme 2 mm (kesik yüzeyi).....                                    | 91           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simge

### Açıklama

$J/cm^2$

Enerji yoğunluğu

$W/cm^2$

Güç yoğunluğu

CW

Sürekli mod

### Kısaltmalar

### Açıklama

ITAB

Isı tesiri altında kalan bölge

Nd:YAG

Neodiyum:ytrium alüminyum garnet

SEM

Spektrum elektron mikroskobu

YMK

Yüzey merkezli kübik

Ç.S.

Çökelme sertleşmesi

## 1. GİRİŞ

Oldukça geniş kullanım alanına sahip olan lazer modern yaşamın önemli araçlarından. Örneğin CD ve DVD'lerle müzik dinleme ve film izleme şeklimiz evrim geçirmiştir. Lazer göz ameliyatları insanlara gözlüksüz bir yaşam sağlamaktadır. Benzer şekilde, lazer yazıcılardan çıkan yüksek kalitedeki fotoğraflar, fotoğrafçılığı karanlık odadan bilgisayar dünyasına taşımıştır [1].

Uydu, bilgisayar ve entegre devre ile birlikte yüksek teknolojinin sembolü olan lazer 20. yüzyılın ikinci yarısında, en büyük icatlar listesinde zirveye yakın bir yere sahip olmuştur. Lazer “uyarılmış ışınım yayımıyla mikrodalga yükseltilmesi”nin (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kısaltması olan “maser”in oğludur. Çünkü uyarılmış yayım uygulamaları, ışık alanından önce mikrodalga alanında ortaya çıkmıştır. Maser 1954’te doğmuş, ancak 1960’ta Amerikalı Maiman ilk yakutlu lazeri gerçekleştirmiştir [2].

Üzerine odaklanmış lazer ışınından etkilenmeyen çok az malzeme mevcuttur. Metal ve alaşımları, termoplastikler gibi ergime fazı düşük viskoziteli malzemeler  $10^4 \text{ W/mm}^2$  mertebesinde güç yoğunluğunda ısı etkisiyle kesilirler. Yardımcı gazın ergime kesme etkisiyle eriyen kısımda kesme aralığı oluşur. Bazı cam, seramik ve kompozitler gibi ergitilemeyen malzemeler,  $10^6 \text{ W/mm}^2$  gibi daha yüksek mertebedeki güç yoğunluğunda buharlaştırılarak lazer ışını ile kesilirler. Sert, kırılman malzemelerde (bazı cam ve seramikler) lazer ışınıyla buharlaştırma ile çentik açılarak bu bölgelerde gerilme oluşturulur, bu bölgeler bükme ile birbirinden ayrılır [1].

Düşük güçlü  $\text{CO}_2$  lazerler düz levha kesimlerinde kullanılırken, Nd:YAG lazerler veya diyot lazerler üç boyutlu kesim için kullanılırlar. Lazer ile kesmede düşük güç, daha az deformasyon, dar yeniden katılaştıran bölge ve dar ısıdan etkilenmiş bölge sağlarken; yüksek güç daha yüksek kesme hızı

sağlamaktadır. Temas olmayan doğasından dolayı lazer ile kesmede takım aşınması, takım depolama masrafı, takım ayarlama zamanı gibi maliyet artırıcı işlemler yoktur. Esnek bir üretim sistemi olup, prototipleme ve yığın üretilere uygundur [1].

Lazer endüstride kesme, delme, kaynak vb. işlerde kullanılmaktadır. Günümüzde endüstriyel anlamda en çok CO<sub>2</sub> ve Nd:YAG lazerleri kullanılmaktadır. Lazer tezgahları takıma ihtiyaç duymaksızın, malzeme ile temas olmadan çapaksız, hızlı işleyebilen, buna karşılık ortamda yüksek ısı olduğundan malzemede istenmeyen yanmalar, yüksek kurulum maliyetleri gibi de dezavantajları bulunan makinelerdir.

Bu çalışmada, CO<sub>2</sub> lazer tezgahı ile farklı parametreler kullanılarak kesme işlemleri gerçekleştirilmiş olup, daha sonra optik mikroskopta incelemeler yapılmıştır. Kesme aralıkları, kesik yüzeyleri ve drosslar incelenerek parametre değişmesi neticesinde kalitenin ve kesme aralığının ne şekilde değiştiği irdelenmiştir. 3mm ve 4mm kalınlıktaki numunelerde ITAB incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

B. S. Yılbaş [3] paslanmaz çelik levhaların CO<sub>2</sub> lazer ile kesiminde çeşitli düzeylerde ve kombinasyonlarda kesme parametreleri kullanmıştır. Bu parametreler; kesme hızı, yardımcı gaz basıncı, levha kalınlığı ve lazer puls frekansıdır. Genel kesme kalitesinde ölçülebilir değişkenler olarak dalgalanma (oyuklaşma), düzlemsellik ve metalürjik değişimleri göz önüne almıştır. Elde edilen sonuçlar seçilen her parametrenin lazer kesimine etkisinin belirgin olduğunu göstermiştir. Yılbaş, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncının, kesme kalitesine etkisinin en belirgin olduğunu gözlemiştir. Bu durumda kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı tek başlarına genel kesme kalitesini etkilemektedir. Parametrelerin, kesme hızı - yardımcı gaz basıncı, malzeme kalınlığı - yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansı - kalınlık gibi birinci derece etkileşimlerinin dalgalanma, düzlemsellik ve genel kesme kalitesi üzerinde belirgin etkisi olduğu gören Yılbaş, sonuç olarak yardımcı gaz basıncının, kesme kalitesini lazer puls frekansı, levha kalınlığı ve kesme hızı ile birlikte etkilediğini belirlemiştir. İkinci derece etkileşimleri incelediğinde sadece kesme hızı - yardımcı gaz basıncı - lazer puls frekansının dalgalanma ve genel kesme kalitesinde etkisini görmüştür. Bu çalışmayla Yılbaş, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansının lazer ile kesmede en önemli parametreler olduğunu belirlemiş, ek olarak malzeme kalınlığının da kesme kalitesini etkilediğini, birinci derece etkileşimlerinin sonuçlarından ortaya çıkarmıştır.

N. Rajaram ve arkadaşları [4], 4130 çeliğinin CO<sub>2</sub> lazer ile kesme işleminde kesik kalitesini inceledikleri çalışmalarında öncelikle 4130 çelik numunelerini kesmiş, lazer gücü ve kesme hızının kesme aralığı, yüzey pürüzlülüğü, oyuk sıklığı ve ısı tesiri altında kalan bölge büyüklüğüne etkilerine bakmışlardır. Çalışma da kullandıkları parametreler kesme hızı ve lazer gücüdür. Malzeme kalınlığı, lazer puls frekansı, yardımcı gaz basıncı ve duty sabit tutulmuştur. Yapılan incelemeler ile birlikte lazer gücünün kesme aralığında önemli bir etkisi olduğu halde kesme hızının daha az etkisi olduğunu gözlemişlerdir.

Lazer gücünü azaltıp, kesme hızı arttırıldığında genelde kesme aralığının ve ITAB'ın azaldığını görmüşlerdir. Düşük güç düzeylerinde, kesme hızını arttırmak kesme aralığının ve ITAB'ın çok az seviyelere düşmesine sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yüksek güç seviyelerinde ise kesme hızının artması kesme aralığında daha büyük azalmalara neden olurken, ITAB'da küçük artmalara neden olmuştur. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne ve oyuk oluşumunda önemli etkisi olduğunu görmüş, hız arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığını belirlemişlerdir. Çalışmalarında lazer gücünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin az olduğunu gözlemişlerdir.

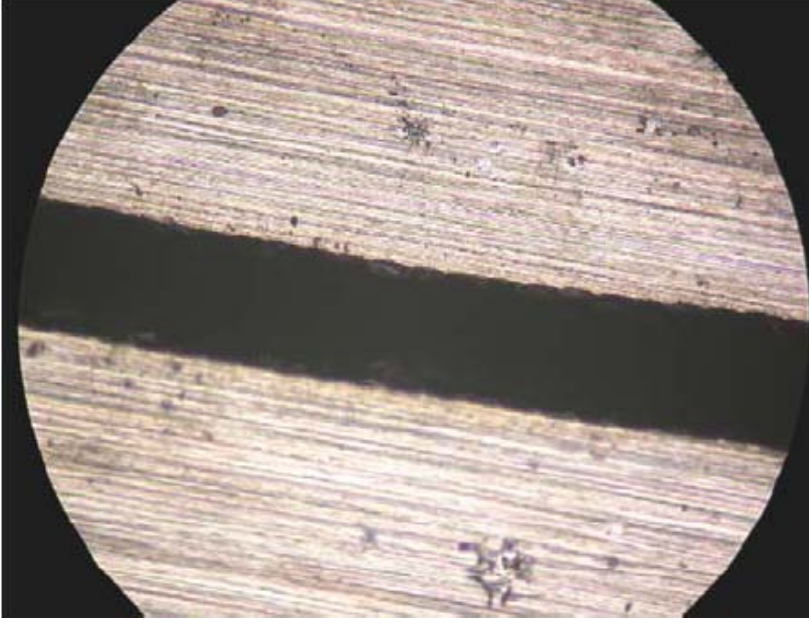
İ. Uslan [5] yumuşak demir malzeme kullandığı çalışmasında CO<sub>2</sub> lazer ile kesmede kesim sırasındaki kesme aralığı değişimini incelemiştir. Ayrıca odaklama lenslerinin odak ayarlarının oyuklaşma parametrelerine etkisini incelemiş, çalışma sırasında odaklama lenslerinin odak ayarlarını değiştirmiştir. Uslan, kesme aralığı ile ilgili matematik model oluşturmuş, kesme aralığının matematik model esas alınarak, güç ve odak ayarları ile ilgisini çıkarmıştır. Güç yoğunluğunun fazla olduğu durumlarda kesme hızının azaltılmasının kesme aralığını belirgin oranda arttırdığını görmüştür. Kesme hızının kesme aralığına etkisinin lazer gücünden daha az olduğunu belirlemiştir. Matematik modelleme ile elde edilen sonuçların, daha önceki çalışmaların sonucuyla [6] tutarlı olarak gücün artışıyla birlikte kesme aralığının arttığını belirlemiştir. Çalışma sonucunda kesme aralığının kesme hızının artmasıyla azaldığını da gözlemiştir. Tahminlerle paralel olarak, elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar lazer gücünün azaldığı yerlerde kesme aralığı değişiminin arttığını göstermiştir. SEM mikrograflarda kesik yüzeylerinde hızlı soğumaya bağlı olarak mikro-çatlaklar gözlemiştir.

K. A. Ghany ve M. Newishy [7] sürekli dalga modu ve puls modunda Nd:YAG lazer kullanarak 1.2mm östenitik paslanmaz çelik plakalarla bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın amacı daha önce lazer ile kesmede bir çok çalışma yapıldığı halde, puls ve sürekli dalga modlu Nd:YAG lazer kullanılarak paslanmaz çelikteki kesme kalitesi ile ilgili pek fazla çalışma bulunmamasıdır.

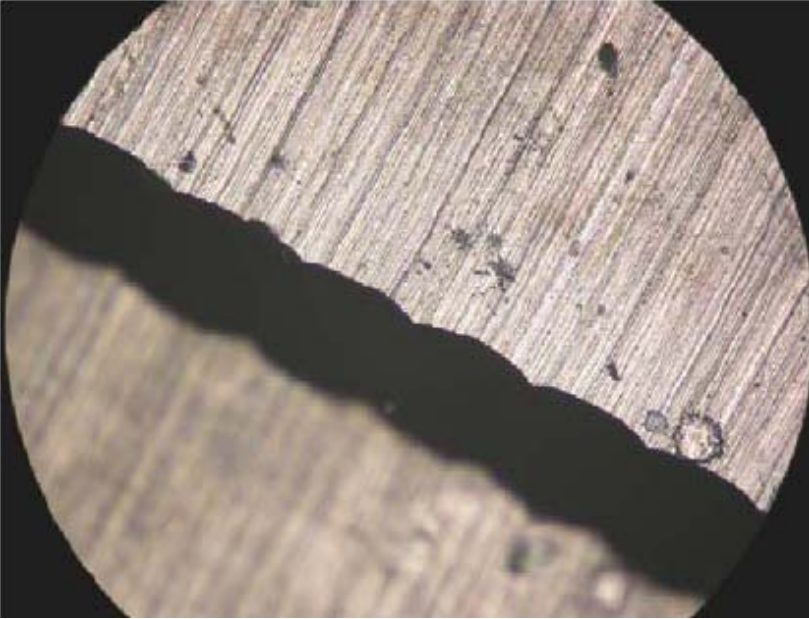
Bu çalışmada, lazer puls frekansı, duty çevrimi, ortalama lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz çeşidi ve basıncının, kesme yüzeyine yapışan çapak oluşumuna, kesme aralığına, kesme yüzeyi pürüzlülüğüne, oyuk çizgileri oluşumuna ve ITAB'a etkisini incelemiştir. Kesme kalitesi belirlenirken kesme yüzeyine yapışan drossların görsel muayenesi, kesme aralığı ölçümü, kesme yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ), oyuklaşma çizgileri ve ITAB'ın incelenmesi kullanılmıştır. Sonuç olarak pulslu lazer modunda şu parametrelerde çapaksız ve keskin kesme yüzeyi elde etmişlerdir:

- lazer puls frekansı: 200-250 Hz,
- duty çevrimi: %40,
- uygulanan gerçek güç: 210-250 W,
- programlanmış en yüksek güç,  $P_p = 800 - 1100$  W,
- kesme hızı = 1-2 m/dak,
- odaklama pozisyonu = “-0,5” - “-1” mm,
- nitrojen gaz basıncı = 9 - 11 bar.

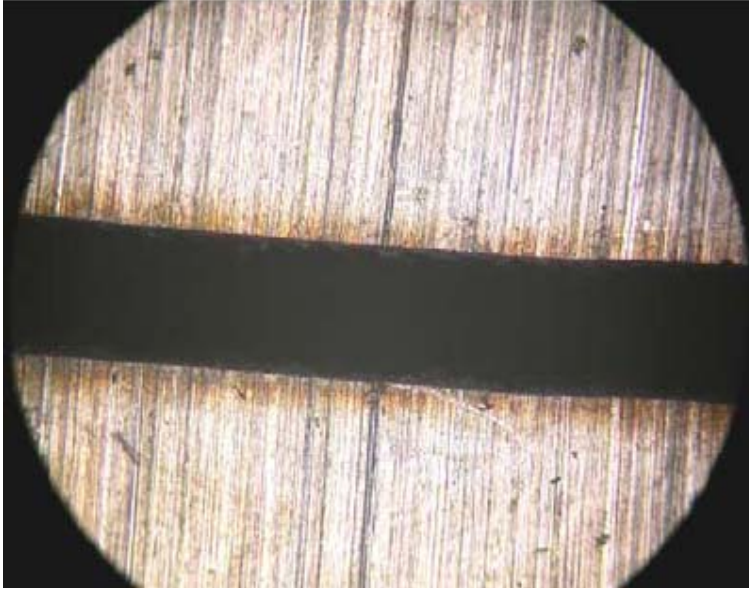
Sürekli dalga modu için ise odaklama pozisyonu ve gaz basıncı aynı hız= 6-8 m/dak, güç= 900-1100 W'da çapaksız ve keskin kesme yüzeyi görmüşler, K. A. Ghany ve arkadaşları [7], kesme kalitesini temel olarak kesme hızı, kesme modu, lazer gücü, lazer puls frekansı ve odak pozisyonunun etkilediğini göstermişlerdir. Lazer puls frekansı ve kesme hızını artırmaları, kesme aralığını ve pürüzlülüğü azaltırken, güç ve gaz basıncını artırmaları, kesme aralığını ve pürüzlülüğü arttırmıştır. Yüksek hızda daha dar kesme aralığı oluşurken, düşük hızda daha geniş kesme aralığı oluşmuştur (Resim 2.1-Resim 2.4).



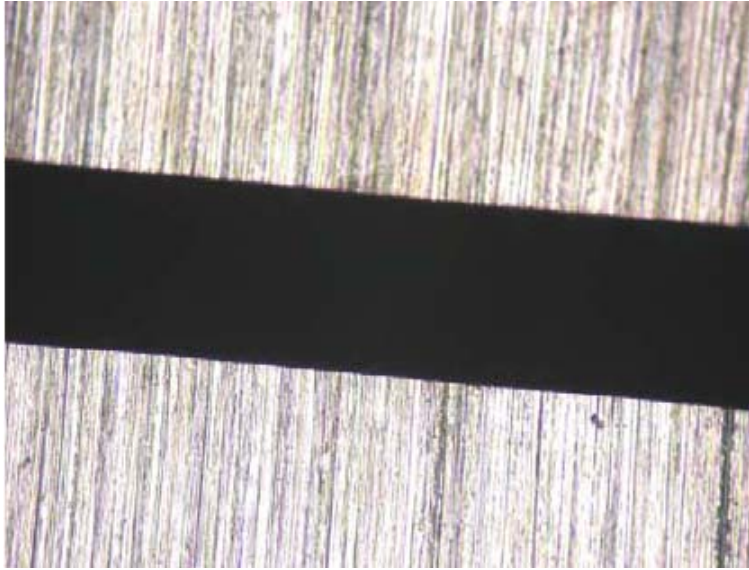
Resim 2.1. Puls mod hız=1 m/dak frekans= 250 Hz [7]



Resim 2.2. Puls mod hız=3 m/dak frekans= 250 Hz [7]

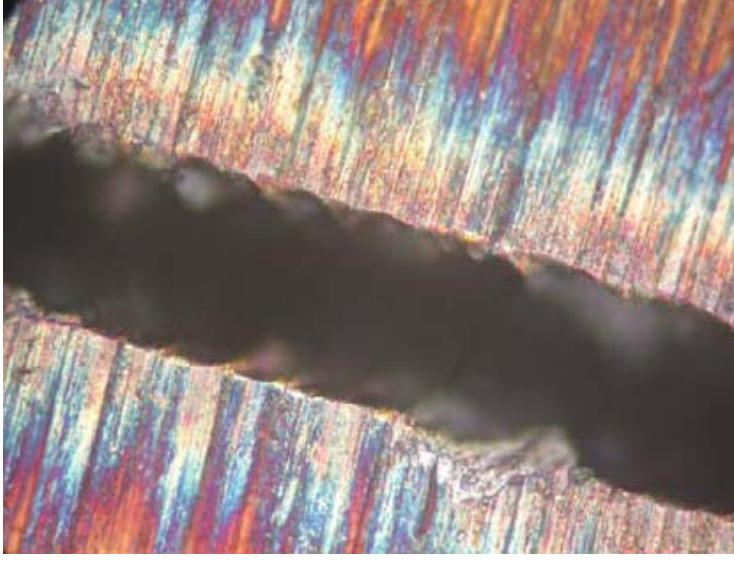


Resim 2.3. CW mod hız=1 m/dak Güç=210 W [7]

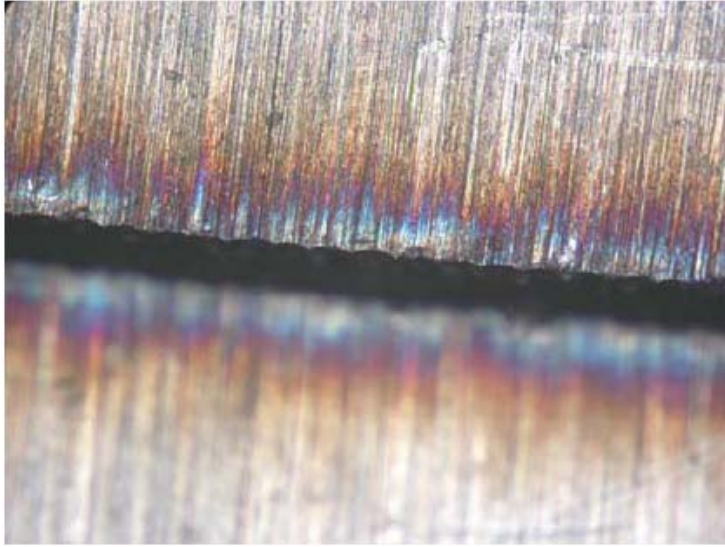


Resim 2.4. CW mod hız=6 m/dak Güç=900 W [7]

Oksijen gazı kullanımı Resim 2.5 ve Resim 2.6'da görüldüğü üzere daha geniş kesme aralığı ve daha pürüzlü bir yüzey oluşmasına neden olmuştur.



Resim 2.5. Oksijene bağılı olarak geniş kesme aralığı [7]



Resim 2.6. Oksijene bağılı olarak düzensiz ve kaba kenarlar [7]

B. S. Yılbaş [6] lazer ile kesme kalitesi ve ısı etki analizi çalışmasında, kesme aralığı lump parametre metodu ile modellemiştir. Deneysel olarak güç yoğunluğunu, kesme hızını, oksijen gaz basıncını ve malzeme kalınlığını değiştirerek, lazer ile kesme gerçekleştirmiştir. Kesme işleminin ardından kesme aralığı, düzlemsellik ve dalgalanmayı mikroskop yardımıyla ölçmüştür. Yılbaş, kesme kalitesinin kesme hızı ve lazer gücünün artışı ile arttığını bulmuştur. Ayrıca kesme aralığının kesme hızının artmasıyla azaldığını, lazer

gücünün artmasıyla kesme aralığının arttığını ve bunun düşük kesme hızlarında daha belirgin olduğunu görmüştür.

Bir başka çalışmasında Yılbas [8] lazer ile kesme esnasında kesme parametrelerinin kesme aralığına etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada lazer yoğunluğu 500 ve 1500W arasında değişirken kesme hızı 1-4 cm/s arasında değişmektedir. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra kesme aralıkları ölçülmüş, SEM ile kesme yüzeyleri incelenmiştir. Çalışmada lazer gücü, kesme hızı ve enerji çifti faktörünün kesme aralığına etkisi incelenmiş ve lump parametre metodu ile kesme aralığı ile oyuklaşma oluşumları modellenmiştir. Sonuç olarak güç ve enerji çifti faktörü artırılırken, hızı azaltmak, kesme aralığının artmasına sebep olmuştur. Enerji çifti faktörünü artırmak kesme aralığını arttırmıştır. Enerji faktöründeki %5'lik artış, kesme aralığında %10'luk bir artış göstermiştir. Lazer gücündeki küçük artışlar, kesme aralığında büyük artışlara neden olmuştur. Ayrıca matematik modelleme ile deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu görmüştür.

Diğer çalışma bir çalışmada C. Karataş ve arkadaşları [9], çelik levhaların lazer ile kesiminde ışın bel pozisyonunun ve malzeme kalınlığının, kesme aralığı ve oyuk oluşumlarına etkisini incelemişleridir. Işın bel pozisyonunun kesme aralığını belirgin olarak etkilediğini görmüşler, ayrıca artan malzeme kalınlığının oyuklaşma derinliğini ve genişliğini arttırdığını ortaya çıkarmışlardır.

B. S. Yılbaş ve arkadaşları ise [10], CO<sub>2</sub> lazerin dalma hızının etkisini incelemişlerdir, incelemeleri sonucunda en iyi kesme kalitesinin en yüksek dalma hızında elde edildiği sonucuna varmışlardır.

### **3. LAZERİN TARİHÇESİ, TANIMI VE ÇEŞİTLERİ**

#### **3.1. Giriş**

1960 yılında, gazeteler yeni bir icattan bahsediyordu-LAZER. Bu icat 1964 yılı yapımı James Bond serisi Altınparmak filminde ilk defa halka sunulup, film efektleri ile metali keserken gösterilmiştir. Bu sırada 3500 mil ötede Atlantik Okyanusu'nun diğer tarafında, 24 yaşında Kumar Patel ve ekibi Bell Telefon Laboratuvarları, New Jersey'de, karbon dioksit lazer üzerinde çalışmaktaydı. Güç seviyeleri önceleri çok düşük sınırlardayken, gaz karışımlarının iyileştirilmesi ve soğutma ekipmanlarının geliştirilmesiyle elde edilen güç artmaya başlamıştır [1].

Bilim kurgu ve endüstriyel araştırmaların çakışması çok zaman almamış, Mayıs 1967'de Arthur Sullivan (Services Electronics Araştırma Laboratuvarları) ve Peter Holudcroft (Kaynak Enstitüsü, Abington) 2,5 mm kalınlığındaki takım çeliğini karbon dioksit lazer ile kesmeyi başarmıştır [1].

#### **3.2. Lazerin Tarihçesi**

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimesi "uyarılmış ışınım yayımıyla ışığın yükseltilmesi", şeklinde ifade edilmektedir. Lazer tek bir dalga boyuna sahip yapışık ve yüksek bir ışıktır, atomik enerjiyi elektro manyetik enerjiye dönüştürür.

Bilim ve Mühendislik tarihinde lazerin gelişimi heyecan verici bir bölümdür. Alışılmamış çeşitlilikteki alanlarda kullanılan cihazların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Lazer tarihine 1917, Albert Einstein ile başlanabilir. Einstein teorik olarak uyarılmış ışınım kavramını geliştirmiştir. Uyarılmış ışınım kavramı lazerde kullanılan bir fenomendir. Uyarılmış ışınım ışığın yükseltilmesini sağlayıp, yüksek yoğunluktaki lazer ışığının elde edilmesini

sağlar. Uyarılmış ışınım prosesinin esas doğası Einstein tarafından teorik olarak açıklanmıştır [11].

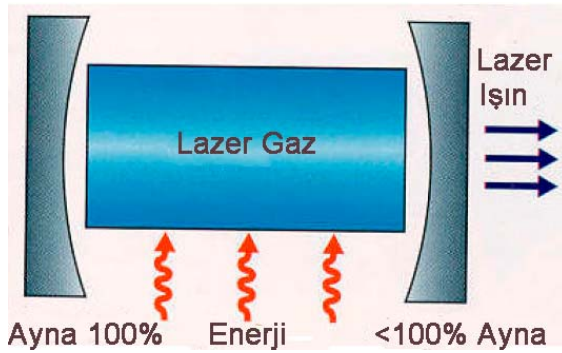
İkinci Dünya Savaşı sırasında bilim dünyasının ilgisi ışık tayfının, mikrodalga kısmına yoğunlaşmıştır. 1954’de Maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation) Charles Townes ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. 1950’lerde masere ilgi artmış ve geliştirme çabaları masere yönelmiştir. Fakat maser günümüzde çok yaygın kullanılmamakla beraber, sadece radyo astronomide alıcı olarak gözükmektedir [11].

İlk defa A. L. Schawlow ve C. H. Townes tarafından 1958’de “Infrared and Optical Masers” adlı yayınlı maserin ışık tayfının görünebilir ve kızılötesi bölgelerinde kullanılabileceği tarif edilmiş ve ortaya çıkan cihaza “optik maser” denilmiştir. Daha sonra bu deyim yerini lazer almıştır [11]. Yakut lazeri ilk olarak Maiman tarafından 16 Mayıs 1960’da sonuç raporları olarak yayınlanmıştır. 1961 yılında Sorokin ve Stevenson U:CaF<sub>2</sub> lazeri ile ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır [12]. Mathias 1963’de N<sub>2</sub> lazerini 1964’de Geusic YAG lazerini Bridges Ar-Ion lazerini bulmuştur. Geçen yıllar sonunda 1970’de CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>’nin O<sub>2</sub> ile yanarak CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O açığa çıkmasıyla ışımaya yapan ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından gerçekleştirilmiştir [13].

1960’ların sonuna kadar endüstriyel alanda pek kullanılmayan lazer, 1970’lerin ortalarında kesme, kaynak, delme ve markalama işlerinde, ölçme ve daha birçok alanda yerini almıştır. Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, excimer ve iyot lazerleri bulunarak ve geliştirilerek lazer teknolojisi bugün, savunma sanayinden endüstriye, tıp alanından, haberleşme, bilgisayar ve hatta eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılır hale gelmiştir [11,13].

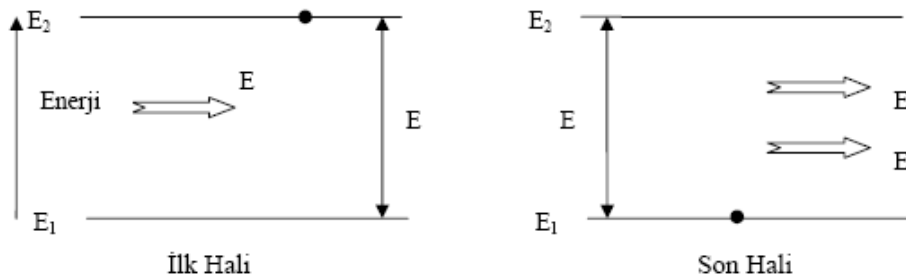
### 3.3. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları birçok enerji düzeyi gösterir ve bu enerji düzeyleri arasında gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye “teşvik edilebilir” ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur [14].



Resim 3.1. Lazer çalışma prensibi[12]

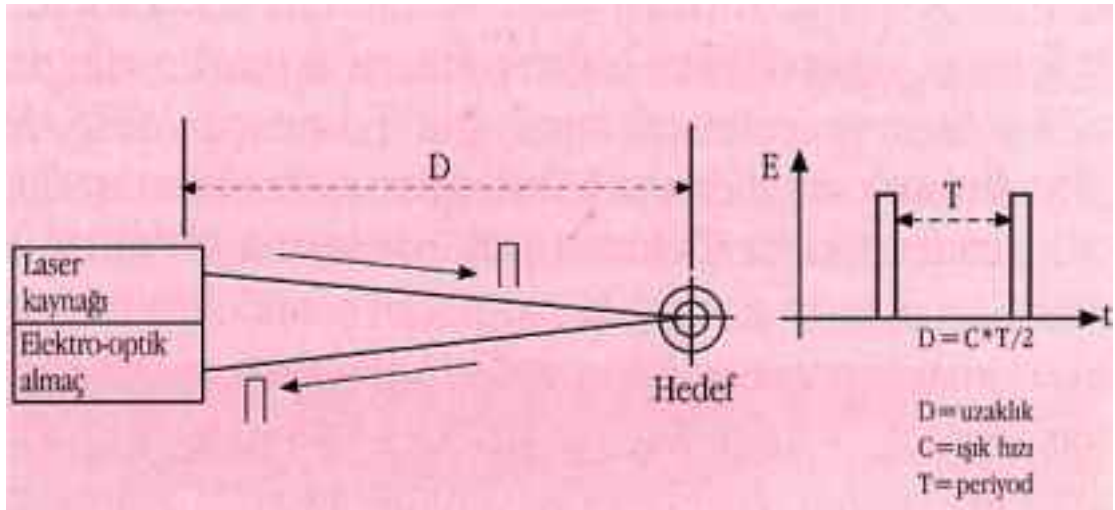
Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır; yani o elementteki atomların elektronları kararlı yörüngeleri olan belli bir enerji düzeyinde bulunurlar. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkarak tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjiyi dışarı salma işlemi lazerin ana prensibini oluşturmaktadır [12].



Şekil 3.1. Enerji seviyesi diyagramı

Eğer atom dalga boyu (rengi) kendisine uygun düşmeyen bir ışık demeti (dalga boyu) ile uyarılmış ise enerjisini spontane ışını şeklinde yayar. Eğer kendisine tam olarak uygun düşen bir ışık demeti ile uyarılmış ise çok kısa bir sürede yerleştirildiği ışık demeti ile aynı doğrultuda ve daha parlak bir ışık demeti şeklinde ışıtır. Bu "bindirilmiş (yükseltilmiş) ışıtır" olayıdır (Şekil 3.1) [12].

Lazer kaynağı olarak kullanılan malzemenin (kristal, gaz, sıvı) yapısını oluşturan atomların en son yörüngelerindeki elektronları dışarıdan enerjilendirilerek (pumped) bir üst yörüngeye çıkması sağlanır. Verilen enerji kesildiği zaman elektron tekrar kararlı konumuna geçer (bir alt yörüngeye düşer). Bu sırada kazanmış olduğu enerjiyi foton şeklinde yayar. Yayılan bu enerji lazer kaynağının iki tarafında bulunan yansıtıcı aynalar vasıtası ile kendi ortamında döndürölür. Bu işlem elektronların tekrar tekrar uyarılması ile devam eder. Böylece eş fazda şiddeti çok artarak uyarılmış ve o atomun frekans (renk) karakteristiklerini taşıyan güçlü bir ışıtır (foton demeti) elde edilir. Tek dalga boyunda yoğunlaştırılarak yönlendirilmiş lazer ışığı ~ %25 geçirgen olan aynadan bir Q anahtarı yardımı ile açığa çıkar (Şekil 3.2) [14].

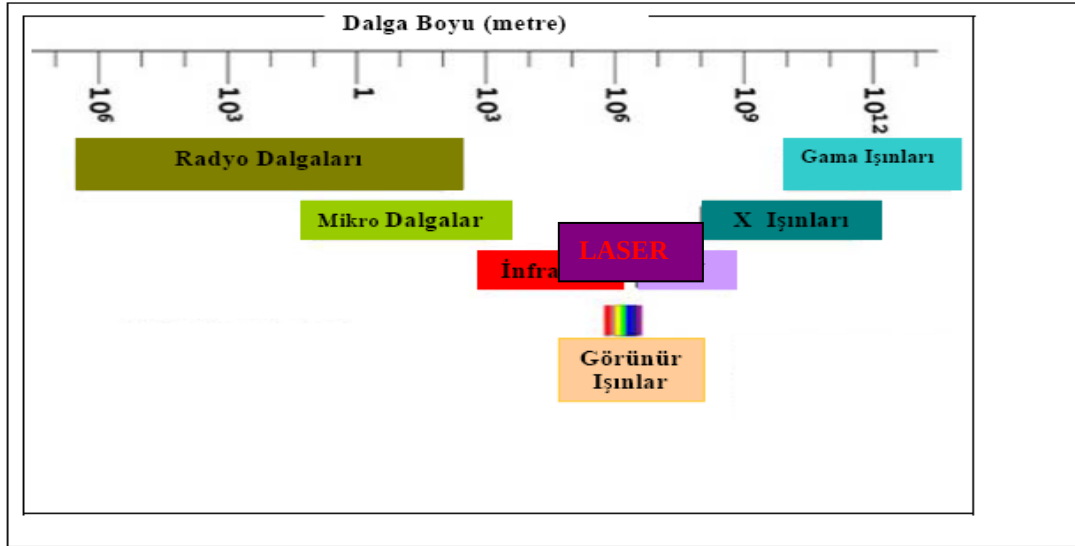


Şekil 3.2. Q anahtarlı yakut (Cr<sup>3+</sup> Ruby) lazer

Lazer ışığı üretilen ortamdan birim anahtarlama zamanında açığa çıkan enerjiye Q değeri ve bu işleme Q anahtarlama denir. Q anahtarlama metotları döner aynalar (1000 dönme/sn.), elektro-optik ve akustik-optik şekillerinde olabilir. Elektro-optik ve akustik-optikte çalışma prensibi, polarizasyon kuramlarının çeşitli uygulamalarına dayanır [14].

### 3.4. Dalga Boyları ve Lazerin Yeri

Aşağıda şekilde görüldüğü üzere her bir ışına ait dalga boyu sınırları ve lazerin yeri belirtilmiştir.



Şekil 3.3. Dalga boyları ve lazerin yeri [15]

### 3.5. Lazer Çeşitleri

#### 3.5.1. Optik pompalamalı katı lazerler

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyararak yüksek enerji düzeylerine çıkmasını sağlamanın yollarından biri lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olduğundan güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi gerekir [2].

Optik pompalamalı lazerde uygun malzemeden yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve lazer ışığının yansıyabilmesi için ayna ile kaplanmıştır. Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığının bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. İlk lazerde yapay bir gök yakut kristali (safir, alüminyum oksit) olan pembe yakut kullanılmıştır. Sonraları birçok toprak elementleri kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimdir. Bu tür lazerden çok güçlü ışık çakımları biçiminde binlerce wattlık güçler elde edilebilir [2].

### **3.5.2. Sıvı lazerler**

Katı lazerlerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılma ve hasar ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camlı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (örn. neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi olanaklı olur. Ne var ki inorganik sıvıların pek azı lazerlerde kullanılmaya elverişlidir [2].

### **3.5.3. Boyar maddeli lazerler**

Bazı organik boyarmaddeler flüorışma özelliği gösterir. Bir başka deyişle üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlarlar. Atomlarının uyarılmış durumda bulunma süresinin çok kısa (saniyenin kesri kadar) olmasına ve yayımlanan ışığın dar bir bantta toplanmasının olanaklı olmamasına karşılık, boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının nedeni bunların geniş frekans bölmesi içinde ayarlanabilme özelliği göstermesidir [2].

Rodamin 6G gibi boyarmaddeler başka bir lazerle uyarılma sonucunda lazer etkisi gösterir. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G, sürekli olarak çalışan (ışığı darbeler biçiminde değil sürekli bir demet olarak veren) ilk lazerin gerçekleştirilmesinde yararlanılan boyarmaddedir. Böylece frekansı ayarlanabilen sürekli bir lazer demetinin elde edilmesi olanaklı olmuştur. Bir başka boyarmadde olan metilumbelliferon, hidroklorik asitle karıştırıldığında ışık tayfının morötesinden sarıya kadar uzanan bölgesinde lazer etkisi gösterir. Böylece tayfın bu bölgesinde istenen dalga boyunda lazer ışığı elde edilebilir [2].

#### **3.5.4. Gaz lazerleri**

Gazlı boşalmada atomlar uyarılmış düzeylere geçerler ve ışık yayımlarlar. Bu olgunun en yaygın örneği ışıklı neon lambalarıdır. Bu süreçte bazen çok sayıda atom, belirli bir enerji düzeyinde birikebilir. Boşalmalı lambalı iki ucuna aynalar yerleştirilecek olursa lazer etkisi ortaya çıkar. Bu olguya yol açan koşullar seyrek ortaya çıkar ve boşalmanın ortaya saldığı ışınımındaki dalga boylarının pek azı için geçerlidir. Ancak birçok gazda lazer etkisi oluşturulabilmektedir. Elde edilen lazer demeti ideal doğru çizgiye çok yakındır. Bu nedenle inşaat işlerinde hizalama amacıyla kullanılır [2].

#### **3.5.5. Dinamik gaz lazerleri**

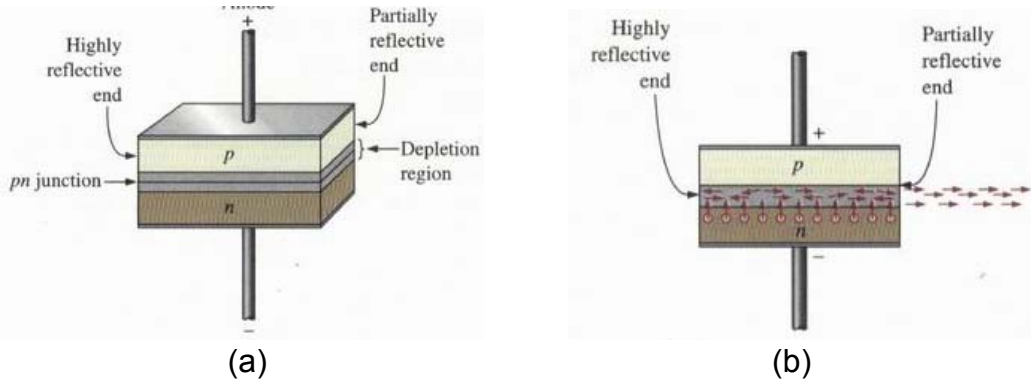
Sıcak bir gaz hızla soğutulursa, alçak enerji düzeylerinin birindeki moleküllerin sayısı daha hızlı azalıp yüksek bir düzeydeki moleküllerin sayısının altına düşebilir. Bu durumda lazer etkisi ortaya çıkar. Bu koşul, yanmakta olan ve azotla karıştırılmış karbon monoksitin bir jet (fışkıрма) memesinden çıkarken birden genişlemesi sırasında sağlanabilir. Böyle bir lazerden 30 000 W'ın üstünde yüksek güçler elde edilebilmiştir [2].

### 3.5.6. Kimyasal lazerler

Bazı kimyasal tepkimelerde lazer etkisinin oluşmasına yeterli olacak sayıda yüksek enerjili atomlar ortaya çıkar. Örneğin, hidrojen ve flüor elementleri hidrojen flüorür oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde ortamda bulunan  $\text{CO}_2$  gazında lazer etkisi oluşur. Bu tür lazerlerde az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek olanaklıdır [2].

### 3.5.7. Yarı iletken lazerler

Yarı iletken lazerde farklı türden katkılanmış iki yarı iletken madde düz bir bitişim oluşturacak biçimde yan yana getirilmiştir. Böyle bir aygıttan yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde lazer ışığı ortaya çıkar. Çıkış güçleri sınırlı olan yarı iletken lazerler, maliyetlerinin düşüklüğü, boyutlarının küçük olması ve verimliliklerinin yüksekliği nedeniyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık ölçme aygıtlarında kullanılır [2].



Şekil 3.4. a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Yarı iletken lazer oluşumu

### 3.5.8. Lazerlerin yükselteç ve osilatör olarak kullanılması

Lazerlerin çoğunda etkin malzeme uzun ve dar bir sütun biçimindedir, bunun iki ucuna birbirine bakan birer ayna yerleştirilmiştir. Aynalar kaldırılırsa bu aygıt, güçlü bir lazer demetini yükselterek daha da güçlü bir lazer demeti oluşturmak amacıyla kullanılabilir. Aynaların varlığı ise aygıtın bir osilatör (titreşim üretici) olarak çalışması sonucunu doğurur. Bu durumda üretilen

lazer demetinin dalga boyu, başlıca iki etmene bağlıdır: Aynalar arasındaki uzaklık ve lazer ortamının nitelikleri [2].

### **3.5.9. Kısa, güçlü darbeler üreten lazerler**

Yükselteç olarak çalışan sütun ile iki uçtaki aynalar arasına yerleştirilen bir engelleyici (obtüratör) kapalıyken lazer etkisi oluşmaz. Lazer etkisinin ortaya çıkması için gerekli koşullar sağlanmışken engelleyici birden açılırsa, sütunda depolanmış durumdaki enerji, saniyenin çok küçük bir kesri kadar süren ve tepe gücü birkaç yüz bin kilowatt olabilen çok güçlü bir ışık darbesi biçiminde açığa çıkar. Bu işleme “Q anahtarlama” denir. Q anahtarı mekanik bir engelleyici olabilir; ama genellikle normal durumda ışık geçirmeyen, bir elektrik darbesi uygulandığında ise saydam duruma geçen sıvı ya da katı bir optik engelleyici kullanılır. Engelleyici olarak, normal durumda ışık geçirmeyen, ama üzerine lazer ışığı düşürüldüğünde saydamlaşan bir boyarmaddeden de yararlanılabilir [2].

Bir lazer genellikle birkaç kipte birden (bir başka deyişle, değişik frekanslarda) titreşim yapar. Bu kipler kip kilitlenmesi denen bir yöntemle eş zamanlanabilir. Bu durumda daha da güçlü ve kısa süreli darbeler elde edilir. Böyle darbelerden çok hızlı delik açma işlemlerinde yararlanır. Deliğin açılması o kadar kısa sürede gerçekleşir ki, çevredeki malzeme bu işleminden etkilenmez. Bu tür ışık darbeleri bilimsel araştırmalarda da kullanılır [2].

### **3.5.10. Ayarlanabilir lazerler**

Lazerin değişik frekanslara ayarlanabilmesi bilimsel araştırmalar açısından önemli bir özelliktir; bu olanağı sağlayan lazer türleri arasında geniş bir frekans bandında çalışabilen boyarmaddeli lazerler başta gelir. Aynalardan biri yerine yalnızca belirli bir frekanstaki ışığı yansıtan bir ayna (örn. bir kırınım ağı) konarak istenen dalga boyu seçilir. Bazı katı lazerlerde, sıcaklık ve kristalin yönlenişi değiştirilerek, dar bir frekans bölgesi içinde ayarlanabilir.

Kimi lazerler ise, harmonikler (gelen lazer demeti frekansının tamsayı katları frekanslı demetler) üretebilir. Lityum iyodat kristalinin bu özelliğinden yararlanılarak, kızılötesi ışıınımdan sudan daha kolay geçebilen yeşil lazer ışığı elde edilir [2].

### 3.5.11. Katı lazerleri

Kullanılan ilk gereç yakuttur (1960). Bu, % 0,05 oranında üçdeğerli krom iyonları ( $\text{Cr}^{+++}$ ) içeren, saydam bir  $\text{Al}_2\text{O}_3$  alümina kristalidir. Krom iyonlarının enerji düzeylerinin konumu nedeniyle nüfus evirtimine olanak verir. Uygulamada, yapay yakutlardan yontulmuş çubuklar kullanılır. Yayım dalga boyu, kızıl bölgede 694,3 nm'dir. Başiboş çalışmada bir yakut lazeri 30-40 kW, darbeli çalışmada ise 30 ile 100 MW arası güç sağlar [2].

*Neodimli cam*, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra ortaya çıkmıştır. Burada, neodim iyonlarıyla ( $\text{Nd}^{+++}$ ) katkılanmış biçimsiz bir malzeme (cam) söz konusudur. Bu, 1 060 nm de (yakın kızılötesi) yayım yapan, 4 düzeyli bir malzemedir. Neodimli cam lazerleri yalnızca darbelidir. Bunların birbirinden oldukça farklı iki türü vardır. Askeri uzaklık ölçümde kullanılan küçük lazerler ve plazmaları, çekirdek kaynaşmalarını incelemelerde kullanılan yüksek güçlü lazerler. İkinci tür lazerler bir lazer yükselteçleri bataryası biçimindedir [2].

YAG (Yttrium Alüminyum Garnet) neodime katkılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Bu gereç sürekli ya da darbeli bir çalışmaya olanak verir. Erbiyum ya da holmiyum iyonları gibi başka malzemeler üzerinde de incelemeler yapılmaktadır [2].

### 3.5.12. Gaz lazerleri

Ortam çoğu kez bir gaz karışımından oluşur. Karışımındaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla öbürüne aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte, helyum-neon lazerleridir. Bu lazerlerde

yayım çizgilerini veren neon gazıdır. En çok kullanılan dalga boyu, kızıl bölgede 632,8 nm'dir. 1150 ve 3390 nm'lik tayf çizgileri de kullanılabilir [2].

İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan gaz lazerleridir. En yaygın olan argon lazeridir. Argon atomları, bir elektrik boşalmasının elektronlarıyla çarpışarak iyonlaşır. Bu lazerlerle çok sayıda tayf sayısı elde edilebilir (mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496,5 nm ve 514,5 nm). Yayımlanan güç yüksektir (onlarca watt). Karbondioksit lazerlerinde, CO<sub>2</sub> karbondioksit moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışım CO<sub>2</sub>, azot ve helyumdan oluşur ve uyarma azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli ya da darbeli olabilen yayım kızılaltı bölgede (10,6 µm ya da 9,6 µm) yapılır. Karbondioksit lazerlerinin %10 ile %15 arasında değişen yüksek bir verimi vardır. Maksimum güç, sürekli çalışmada 400 kW, kısa darbeli çalışmada ise 10 TW'dır [2].

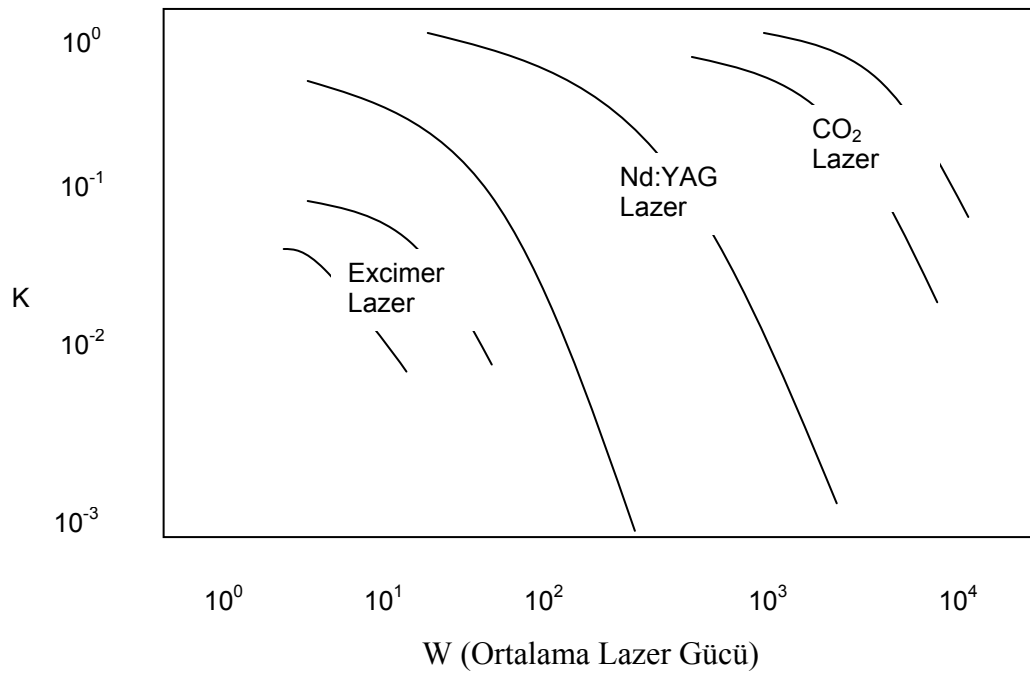
HF/DF kimyasal lazerlerde lazer yayımı verecek olan, titreşim yönünden uyarılmış HF ya da DF moleküllerini üretmek için flüor atomunun hidrojen (ya da izotopu döteryum) üzerindeki tepkimesinden yararlanılır. En güçlü lazerlerde, flüor atomu, F<sub>2</sub> flüor molekülünün (ya da NF<sub>3</sub> bileşiğinin) özel bir odada hidrojenle (ya da bir hidrokarbonla) yanmasıyla elde edilir. Yayım dalga boyları HFF lazer için 2,7 µm, DF lazer için ise 3,8 µm dolayındadır. DF lazer bugüne dek gerçekleştirilmiş olan en güçlü sürekli lazerdir. ABD 'de yapılmış bir ilk örnek, 2,2 MW lik bir güç sağlanmıştır. Metal buharlı lazerlerde (en yaygın olanı helyum-kadmiyum lazeridir) etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdan oluşur. 100 miliwatt'a kadar olan güçlerde, 441,6 ve 325 nm'lik dalga boylarıyla sürekli çalışma sağlanabilir. En son gerçekleştirilmiş lazer tipi olan iyot lazerlerinde etkin ortam olarak atom halinde iyot kullanılır ve cam lazerinin dalga boyuna yakın, 1315 nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayım gerçekleştirilir. Bu tip bir lazer ile 1 TW'lık bir güç sağlanmıştır [2].

### 3.5.13. Serbest elektronlu lazerler

Bunlar, bir hızlandırıcıdan çıkan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit, almalı bir magnetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli yeğin bir ışımaya kaynağı elde etmeye olanak verir. Elektronların enerjileri ya da magnetik alanın dönemi değiştirilerek, X ışınlarının dalga boylarından, uzak kızılötesinin dalga boylarına kadar değişen dalga boyları elde edilebilir [2].

### 3.6. Mod

Mod, lazer ışınının yoğunluk değişimi olarak adlandırılmaktadır. K katsayısının (Şekil 3.5) değeri azaldıkça, ışının kalitesi de düşmektedir. Dolayısıyla bir lazer ışınının en küçük odak çapına ve en küçük enerji yoğunluğuna sahip olabilmesi için bu temel moda mümkün olduğu kadar yaklaşması gerekmektedir. K katsayısı azaldıkça lazer ışınının odaklanma yarıçapı büyümekte ve ışın kalitesi azalmaktadır [16].



Şekil 3.5. Lazer türlerinin K katsayısının karşılaştırılması [17]

### 3.7. Bazı Lazer Türlerinin Karşılaştırılması

Çizelge 3.1'de CO<sub>2</sub>, Nd:YAG ve Excimer lazerlerinin çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması

| Karşılaştırma    | CO <sub>2</sub> Lazeri        | Nd: YAG Lazeri                | Excimer Lazeri                      |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Dalga Boyu (µm)  | 10,6                          | 1,06                          | 0,3-0,2                             |
| Tahrik Tekniği   | Düşük Basıncılı Gaz Boşaltımı | Ark Lambası                   | Yüksek Basıncılı Gaz Boşaltımı      |
| Çalışma Şekli    | CW/P                          | P/CW                          | P                                   |
| Maksimum Güç(kw) | 25                            | 2                             | 0,4                                 |
| Darbe Gücü(kw)   | 10 kW'a kadar                 | 100 kW'a kadar                | 30000 kW'a kadar                    |
| Işın Kalitesi    | Maksimum                      | Düşük                         | Düşük                               |
| Verimlilik(%)    | 5-10                          | 2-5                           | 1-2                                 |
| Fiyat(x1000Avro) | 500                           | 800                           | 650                                 |
| Kullanım Yerleri | Termik prosesler Makro işleme | Termik prosesler Mikro işleme | Mikro alanda termik olmayan işlerde |

### 3.8. Lazerde Farklı Malzemelerin İşlenebilirliği

#### 3.8.1. Endüstriyel çelikler

Endüstriyel çeliklerde, kesme gazı olarak oksijen kullanılmaktadır. Lazer tezgahı sürekli ışın (CW) modunda kullanılır. Bu çeliklerde karbon yüzdesi arttıkça, kesme kenarlarında malzemenin sertleşme özelliği artar ve köşelerde yanık izlerinin oluşumuna sebebiyet verir. Sertleşmenin kesim hızıyla bir ilgisi yoktur. Alaşım oranı fazla malzemelerin kesmek, düşük alaşım oranına sahip malzemeleri kesmekten zordur [16].

Oksijen, kesme gazı olarak kullanıldığından kesme hattında çok az oksitlenme oluşur. Kesme gazı olarak yüksek basınçlı azot kullanılırsa, 4 mm'ye kadar kesim yapmak mümkündür. Bunun sonucu olarak kesim hattında oksitlenme görülmez. Fakat kesim hızı, oksijenle kesim hızıyla kıyaslandığında oldukça yavaştır. Oksijenle kesme hızının %10 ile %30'una

ulařılabilir. Oksitli malzemeler ve temiz olmayan malzeme yüzeyleri düşük kesim kalitesine sebebiyet verir [16].

Geometrisi zor olan malzemeler için lazer nitesi darbeli modunda çalıştırılır. Böylece ince kesitlerdeki baēlantılar ve küçük açılı malzemelerin yanması önlenir. Malzeme yüzeyinde kalan sıcaklık kesim kalitesini olumsuz yönde etkiler. Gerilmelerin giderilmesi gerekmektedir [16].

15-20 mm arası kalınlıklara sahip küçük ebatlı elik malzemelerde ince tane yapılı çeliklerin lazerle kesimi daha uygundur. Bu eliklerin içerisindeki alaşım elementlerinin etkisi önemlidir. Alaşım elementlerinin en önemlisi karbondur. Karbon dışında silisyum, manganez, kükürt içerebilirler. Krom- nikel ve molibden ilavesiyle korozyon direnci arttırılabilir. Çelikler ihtiva ettikleri alaşımlara göre sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Yüksek alaşımlı elikler
- Düşük alaşımlı elikler
- Alaşımsız elikler [18].

#### Çelikteki alaşım elementlerinin kesim sonuçlarına etkisi

##### Karbon

Negatif bir etkinin olmaması için kesim sonunda karbon ieriēinin %1'in altında olması istenir. Oksijen gazının alevli kesimde %1 ile %2 oranında karbon ieriēi kabul edilebilir [18].

##### Kükürt

%0,02 ile %0,05 arasında kükürt oranı kesim sonucunu olumsuz etkiler [18].

### Silisyum

Silisyum oranının yüksek olması kesimi olumsuz yönde etkiler. Silisyum oranının %0,04'ten düşük ve eşit olması lazer kesimi için en uygun orandır. Silisyum oranı %0,25'ten düşükse kesilebilir, ancak kesim kalitesi düşüktür. Silisyum oranı %0,25'ten büyükse lazer kesim için pek uyumlu değildir. Ve iyi sonuçlar alınamaz [18].

### Manganez

Çelikte normal seviyede manganez ihtivası lazer kesim sonucunda olumsuz etkiler yaratmaz [18].

### **3.8.2. Paslanmaz çelik**

Bu çeliklerde, oksijen kesme gazı olarak kullanılabileceği gibi, yüksek basınçlı azot ile de kesim yapılabilir. Eşit kalınlıktaki paslanmaz çelikte; yüksek basınçlı azot, oksijene göre daha hızlı bir kesim sonucu verir.

Azotla kesimde, 5 mm'den kalın paslanmaz çeliklerde çapaksız kesim yapılabilmesi için, odak pozisyonunun ayarlanması gereklidir. Odak pozisyonunun ayarlanması ve kesim hızının düşürülmesi düzgün kesimi sağlar.

Oksijen ile kesimde 5 mm sac kalınlığına sahip paslanmaz çeliklerde düşük hızda ve darbeli kesim yapılması gerekmektedir. Bu çeliklerde de alaşım elementlerinin ihtivası kesim sonuçlarını etkilemektedir [16].

Lazer ile kesme işlemlerinde paslanmaz çelik yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Paslanmaz çelikler ile ilgili bilgiler 5. bölümde detaylı olarak verilmiştir.

### **3.8.3. Alüminyum**

Alüminyum alaşımları, yüksek yansıtma özelliği ve ısı iletkenliğine sahip olmasına rağmen 6 mm kalınlığa kadar kesim işlemi yapılabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının lazer ile kesiminin sürekli modda yapılması tavsiye edilmektedir.

Alüminyum alaşımlarının, paslanmaz çelik gibi oksijen ve yüksek basınçlı azot ile kesimi mümkündür. Fakat azot gazının, endüstride kullanımı oksijene göre daha avantajlıdır. Kesme gazı olarak oksijen olarak kullanılması kesim yüzeyinde pürüzlülüğün oluşumuna ve az da olsa çapak oluşumuna sebebiyet verir. Kesimin azot ile yapılmasıyla, kesim yüzeyinde oksijene göre daha temiz bir yüzey elde edilir. 4 mm'ye kadar çapaksız kesim elde edilmektedir. Fakat daha kalın parçalarda çapak oluşumlarına sebebiyet verir. Bu çapakların temizlenmesi zordur. Saf alüminyumun yüksek yansıtma özelliği nedeniyle 4 mm'ye kadar lazer kesimi mümkündür. Fakat kesmek daha zordur [16].

### **3.8.4. Titanyum**

Titanyumda en uygun kesme gazı bir soy gaz olan argondur. Fakat azot da kullanılabilmektedir. Kesim gazı olarak oksijen kullanılmaz. Oksijen ile yapılmak istenirse titanyum yüksek sıcaklıkta yanar [16].

### **3.8.5. Bakır ve pirinç**

Bakır ve pirinç yüksek ısı iletkenliği ve yüksek ısı yansıtma özelliklerine sahip olduklarından 3 mm'ye kadar kesimleri mümkündür. Bakırın 3 mm'ye kadar kesilmesinde kesme gazı olarak oksijen kullanılır. Azot, yüksek yansımaya sebep olmakla beraber ekipmanlara zarar verebilir. Pirinçlerin, 3 mm'ye kadar kesimde, azot ve oksijen kesme gazı olarak kullanılıp, yüksek basınçla

işlem yapılır. Oksijen ile yapılan kesimler daha kaliteli olduğundan dolayı avantajlıdır [16].

### **3.8.6. Sentetik malzemeler**

Sentetik malzeme olarak termoplastik, termoset malzemeler ve sentetik kauçuk malzemeler işlenebilir. Çok yoğun duman çıkmasından dolayı PVC ve polietilen malzemeleri lazer işlerken su jeti kullanılmalıdır. Akrilik cam lazer ile kesilebilir. Kesme gazı olarak basıncı 0,5 bardan daha düşük olmak üzere azot kullanılır. Bu yolla daha parlak kesme yüzeyi elde edilebilir [16].

### **3.8.7. Organik malzemeler**

Tahta, deri, kağıt lazer ile işlenebilir. İşlenmiş kenarlar, yanmaktan kömür haline gelecektir. Yapışkan tahta işlerken her yapışkan tipi ve çeşidine bağlı olarak temiz bir işleme garantisi elde etmek imkansızdır [16].

## **3.9. Lazer Uygulama Alanları**

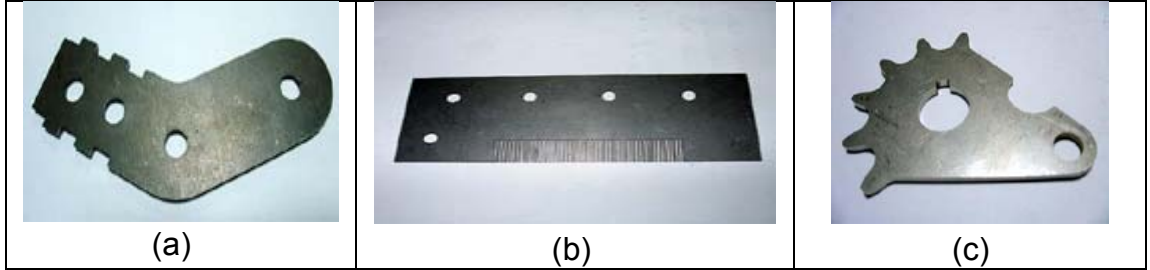
Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda gün geçtikçe daha da önemli olmaktadır [14].

Endüstride;

- Her türlü malzemeyi çok hassas bir şekilde kesme, delme ve kaynak işlemlerinde,
- Mikro elektronikte dirençlerin aktif veya pasif olarak %0,01 hassasiyetinde üretilmeleri,
- Çip üretiminde hat kalınlıklarının 0,25  $\mu\text{m}$ 'den az olarak desenlendirilmesi,
- Yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün ölçümü,
- Yeni maddelerin analiz işlemlerinin yapılması,
- Yüzey sertleştirme.

Bilimsel araştırmalarda;

- Çok hassas bilimsel ölçümler (ışık hızı ölçümü),
- Yerküre üzerindeki hareketlerin hassas ölçümü,
- Malzemelerin kimyasal analizleri.



Resim 3.2. Lazer uygulamaları a)Açılı kesim b)Düz kesim  
c)Oval kesim

Haberleşmede;

- Yeryüzü ile uydular arası haberleşme sistemleri,
- Haberleşme ağında fiber-optik sistemlerle birlikte kullanılması,
- Yüksek yoğunlukta ses ve görüntü bilgileri depolanması.

Tıp ve askeri alanlarda;

- Zarar görmüş dokuların keserek alınması,
- Yaraların iyileştirilmesi,
- Kanamanın durdurulması,
- Göz retinasında oluşan zedelenmelerin giderilmesi,
- Açısal hassasiyet (ışınımının doğrusal şekilde olması),
- Uzun mesafelere ulaşma (Lazer gücünün yüksek olması),
- Mesafe ölçümünde hassasiyet (darbe genişliğinin çok dar olması),
- Selektif tespit (spektral band aralığının çok dar olması sebebi ile),
- Kullanım kolaylığı (küçük boyutta ve hafif olmaları).

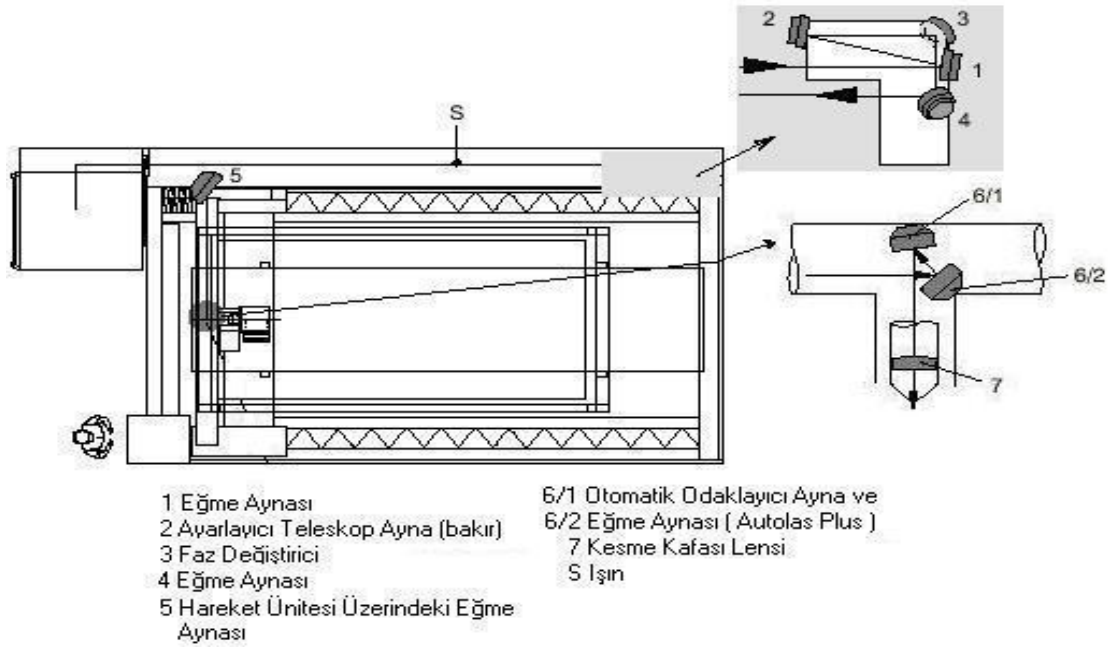
## 4. LAZERLE KESME İŞLEMİ

### 4.1. CO<sub>2</sub> Lazer Tezgahında Lazer Oluşumu ve Makinedeki İletimi

CO<sub>2</sub> lazer tezgahlarında lazer, CO<sub>2</sub> gazına elektrik akımı verilerek oluşturulur. Bunun yanında kullanılan azot ve helyum gazı düşük verimde olan CO<sub>2</sub> lazerine eklenerek verim %30 artırılmaktadır. Gaz karışım oranı CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> = 0,81'dir. Lazer ışını tezgahın rezonatör bölümünde cam tüpler içinde 10m'ye yakın bir mesafe kat eder. Bu tüplerden gaz geçerken iki ucu arasından elektrik akımı verilerek lazer ışını oluşturulur. Şekil 4.1'deki yol lazer ışını tarafından tezgah üzerinde izlenmektedir. Lazerin bir ışın olması sebebiyle aynalar sayesinde yönleri değiştirilebilmektedir. Son olarak lazer ışını kesme kafasına gelmekte burada kesme işlemi yapılmaktadır. Lazer oluşumu için kullanılan gaz silindirlerinin makineye mesafesi ise en fazla 10m kadar olmalıdır. Uygulama basıncı 6-10 bar'dır [19].

Endüstriyel lazerlerin birçoğunda, lazer ışınının oluşabilmesi için özel gazların kullanılması gereklidir. Gazın kalitesi ve seçimi, lazerin güvenilirliğini ve işlemin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Lazer gazları genellikle, yüksek saflıkta özel gazlardır. Lazer gazları, makineye ayrı ayrı tüplerde ya da önceden belli oranlarda karıştırılmış olarak verilmektedir. Bu ön karıştırma ya da gazların ayrı tüplerde verilmesindeki işlem parametreleri (gaz debisi, basınç saflığı vb.) her lazer makinesi üreticisi tarafından belirlenmekte ve o şartlarda makineye verilmektedir [19].

Karbondioksit lazerini oluşturan gazlar karbondioksit, azot ve helyumdur. Bazı lazer gazları 4 ya da 5 bileşen içerebilir (Ortama CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve helyumun dışında CO, H<sub>2</sub> ve Ne eklenebilir) [19].



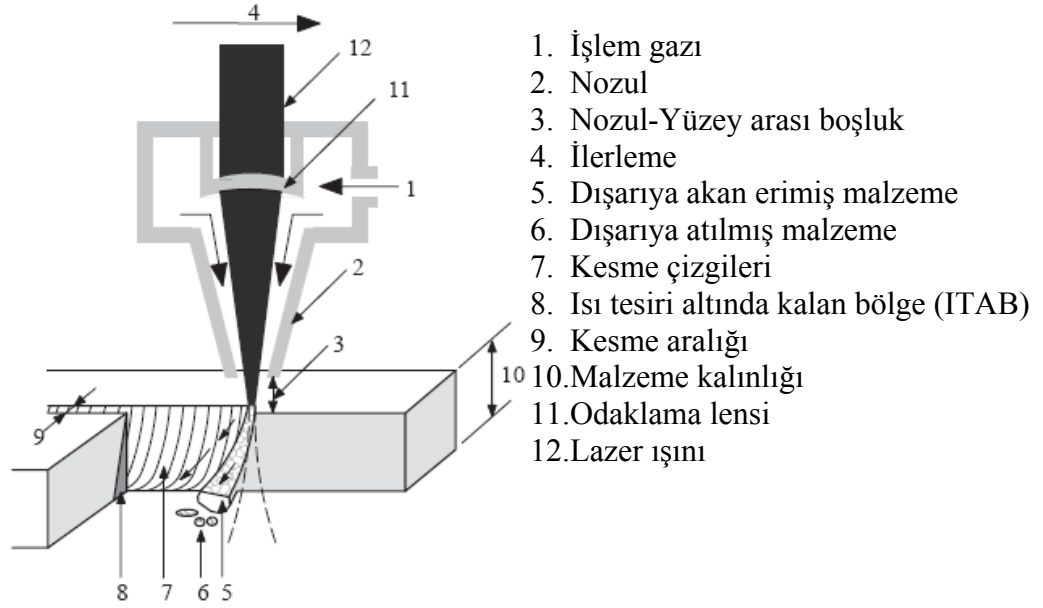
Şekil 4.1. Lazer ışınının tezgah üzerinde izlemiş olduğu yol

## 4.2. Lazerle Kesme İşlemi

### 4.2.1. Kesme yöntemi

Lazer ile kesim aslında bir ısıl işlemdir. Bu kesimde lazer ışını, ısı kaynağı yani kesici görevini yapmaktadır. İyi bir kesimin elde edilebilmesi için lazer ışınının malzemeye tam olarak nüfuz etmesi gerekir. Böylece eriyen malzeme dışarı atılarak yapışması engellenir [18].

Lazer rezonatörde oluşan paralel lazer ışınları lenslere yönlendirilir. Daha sonra ışın malzeme yüzeyine odaklanıp, doğrultulur (Şekil 4.2) [20, 21].



Şekil 4.2. Lazerle kesme işlemi [20]

#### 4.2.2. Lazerle kesme işleminin avantajları ve dezavantajları

##### Avantajlar;

- Malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması: Yani gevreklik tokluk sertlik gibi özelliklerden bağımsızdır.
- Kısa işleme zamanı: Yüksek hızlarda kesim yapabilmektedir.
- Hassas işleme: Mikron derecesinde hatalarla kesme yapabilmektedir.
- Kesme takımı ve iş parçası arasında temas yoktur.
- İşlemler bütünüyle düşünüldüğünde maliyetlerin az olması.
- Esnek kablolar vasıtasıyla elde edilen ışının taşınabilmesi mümkündür.
- Kalıpsız imalat

##### Dezavantajlar;

- Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Isıl işlemden kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar.
- Sınırlı kalınlık/çap oranı ( $H/D=10$ ).

### 4.3. Lazerle Kesme Parametreleri

#### 4.3.1. Lazer parametreleri

##### Güç

Makine operasyonu boyunca sabit güç sağlanması uniform kesme kalitesiyle sonuçlanır. Uygulanacak lazer gücünün miktarı kesme kalitesi açısından son derece önemlidir. Lazer oluşumuna başladıktan sonra sabit bir çıkış gücü elde edilebilmek için 5-10 dakikaya ihtiyaç vardır. Bu olaya geçici güç değişmezliği denir, sıcaklıktan ve gaz basıncından bağımsızdır [22].

##### Işın profili

Ulaşılabılır odak çapı lensin odaklama mesafesine bağlıdır. 2,5 inç lenste 0,12 mm'den küçük ve 5 inç lenste ise 0,2 mm'den küçük odaklama çapına müsaade edilebilir [22].

##### Uzaklaşma açısı

1 mm'lik kırılma bir metre uzunluğundaki ışında 1 mm'lik genişlemeye neden olur. Işığın kırılma açısı sabit bir ışın çapı ve kararlı ışın özellikleri sağlayabilmek için mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır [22].

##### Odaklama noktası

İyi bir kesme kalitesi elde etmenin ön şartlarından biri de doğru odaklama noktası tayin edebilmektir. Çeliğin alev kesiminde 6 mm'ye kadar olan sac kalınlıklarında uygun odaklama yüzeyde olmalı 8 mm ve üzerindeki sac kalınlıklarında odaklama sac yüzeyinin üzerinde olmalıdır [22].

### Lüle ayarı

Lens tarafından odaklanan lazer ışını tam olarak lüle merkezine denk gelmelidir. Lazer ışını 0,05 mm'den daha fazla kaçık olamaz. Kaçık merkezli ışın, alevle çelik sac kesiminde yüzeyde kıvılcımlaşma oluşturur [22].

### Lüle ağzı

Lazer ile kesmede farklı lüle çaplarından yararlanılır. Sac yüzeyi ile lüle arasındaki mesafe de değişkendir. Doğru lüle seçimi kaliteli kesme için çok önemlidir. Çarpma sonucu lüle ağzının ovallik alması gibi durumlar kusurlu kesiklere neden olur [22].

## **4.3.2. İş parçası parametreleri**

### Malzeme çeşidi

Malzemenin ışını ve ısıyı soğurabilme etkisi, kesmede kullanılacak malzeme çeşidini, diğer parametreleri etkilemesi açısından önemlidir. Çünkü bir bakır malzeme uygulanan lazer etkisini iş parçasının diğer noktalarına diğer malzemelere göre daha fazla ve hızlı bir şekilde iletebilmektedir. Saf alüminyum gibi parlak yüzeye sahip malzemeler büyük yansıtma potansiyeline sahiptir ve kötü kesme sonuçlarıyla karşılaşılır [23].

### İş parçası kalınlığı

Lazerle kesmede, iş parçası kalınlığı çeliklerde 15mm'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca malzeme kalınlığına bağlı olarak iletilecek olan ısı, kalınlığın artmasıyla azaldığı böylece buharlaşan metal miktarı ve yüzey kalitesini etkilediği tespit edilmiştir [23].

### İş parçası yüzeyi

Yüzeyin boyalı olması, cilalı olması ya da plastik malzeme ile kaplı olması ters yönde etki yapar. Kaba ve sönük yüzeyler yüksek kesme hızlarına müsaade ederler. % 100 lazer gücüyle yapılan kesme işlemlerinde yüzeyin yağ filmiyle kaplı olması olumlu yönde katkı yapar. Sonuç olarak yüzeydeki cüruf tabakası miktarı azalır. Yüzeyin pas tabakasıyla kaplı olması yüzeyde yanmalara neden olur ve gaz tüketimi artar bu suretle enerji tüketimi de artmış olur. Soğuk haddelenmiş, rengi ağartılmış sacları kesmek daha kolaydır [23].

## **5. PASLANMAZ ÇELİK**

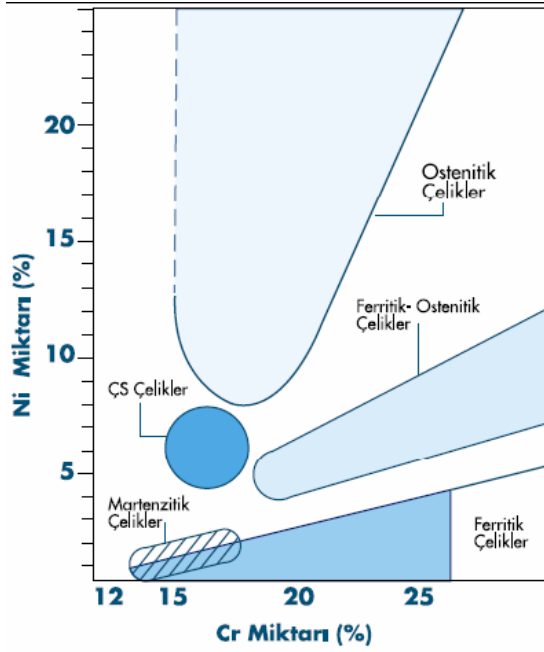
### **5.1. Giriş**

Paslanmaz çelik, 1913 yılında, tüfek namluları için çeşitli metalleri birleştirerek deneyler yaparken bazılarının paslanmaya karşı dirençli olduklarını fark eden Harry Brearley tarafından keşfedilmiştir. Bu çelikler, içlerinde ağırlıkça en az % 10,5 oranında krom (Cr) bulunduran demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Yüzeylerinde oluşan ince ve yoğun krom oksit tabakası, korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller [24].

### **5.2. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması**

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilebilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel, molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi elementlerin eklenmesi ile korozyon dayanımına ek olarak başka özellikler de kazandırılabilir. Böylece tasarımcılar ve imalatçılar değişik kullanım amaçları için en uygun paslanmaz çeliği seçebilirler [24].

Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik veya östenitik olmasını belirler (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları (Ç.S. uygulanabilen alaşımlar)

Paslanmaz çelikler içyapılarına göre beş ana grupta toplanırlar:

- Ferritik paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler
- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik-Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler
- Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler

Endüstride en yaygın olarak kullanılanlar östenitik ve ferritik çelikler olup, kullanımları tüm paslanmaz çelikler içinde % 95'e ulaşır [24].

### 5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikliler %16-25 Cr ve %7-20 Ni içeren üçlü demir krom nikel alaşımlarıdır. Bu alaşımların yapıları bütün işlemlerde östenitik (YMK, demir tipi) yapıda kaldığı için östenitik olarak adlandırılırlar. Bu alaşımlar esas olarak yüksek korozyon dirençlerinden ve şekillendirilebilirliklerinden dolayı üstün bir pozisyona sahiptirler. Bu nedenle pek çok mühendislik uygulaması

için arzu edilen özelliklere sahiptirler. Östenitik paslanmaz çeliklerin en yaygın olarak kullanılan tipleri 302 ve 304'dür. Bu çelikler hem çevre sıcaklıklarında hem de yüksek sıcaklıklarda uygulama alanları bulur [25].

#### Başlıca Özellikleri:

- Mükemmel korozyon direncine sahiptirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir.
- Manyetik değildirler.(Tavlanmış halde)
- Mekanik dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilir [25].

Makine ve imalat sanayinde çeşitli uygulamalar, asansörler, bina ve dış cephe kaplamaları, mimari uygulamalar, gıda işleme ekipmanları, mutfak gereçleri, kimya tesisleri ve ekipmanları, bilgisayar klavye yayları ve mutfak evyeleri, östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanlarından bazılarıdır. Östenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında östenitik (YMK) bir yapıya sahip oldukları için ısıtma işlemiyle büyük bir ölçüde sertleştirilemezler. Buna karşın, bu alaşımların dayanımları soğuk deformasyonla oldukça artırılabilir. Örneğin tip 301 alaşımının akma dayanımı soğuk deformasyonla 40' dan 200 ksi' ye çıkartılabilir. Östenitik paslanmaz çelikler mikro yapıdaki östenitin kararlı hale getirebilirliğine göre kararlı ve yarı kararlı östenitik çelikler olarak iki grupta toplanır. Kararlı östenitik çeliklerin mikro yapıları soğuk deformasyondan sonra östenitik olarak kalır. Yarı kararlı östenitik paslanmaz çelikler soğuk deformasyonla belli bir düzeyde martensite dönüşerek östenit martensit karışımından oluşan yapıyı ortaya çıkarır [25].

Çizelge 5.1. 304 paslanmaz çeliklerin nominal mekanik özellikleri

| Çelik Türü | Isıl İşlem Şartı | Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) | Akma Dayanımı %0,2 (N/mm <sup>2</sup> ) | Uzama (%) | Kesit Daralması (%) | Sertlik (Rockwell) |
|------------|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|---------------------|--------------------|
| 304        | Tavlı            | 586                                 | 241                                     | 55        | 65                  | B 80               |
| 304L       | Tavlı            | 552                                 | 207                                     | 55        | 65                  | B 76               |

## **6. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **6.1. Giriş**

Bu çalışmada farklı parametreler kullanılarak lazer ile kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen lazer kesikleri kullanılarak, kesme parametrelerinin kesme aralığı ve kesme kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### **6.2. Malzeme**

Deneylerde kullanılmak üzere, endüstride yaygın olarak kullanılan, 400°C'ye kadar yüksek oksidasyon sağlayan, mekanik direnç ve sürtünme mukavemeti çok iyi olan 304 paslanmaz çelik sac seçilmiştir. Mutfak eşyaları, evyeler, ev aletleri, endüstriyel mutfaklar, kimya ve petro-kimya sektörü, gıda sektörü, otomotiv sanayi, eşanjör ve boyler üretiminde 304 paslanmaz çelik yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kesmede kullanılan 304 paslanmaz çelik, östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler grubuna girmektedir. Bu çeliklere korozyon dirençlerini arttırmak için çeşitli alaşım elementleri katılmaktadır. Çeliğin içinde yüksek miktarda krom bulunması paslanmayı önlemekte, kromla beraber nikel bulunması özellikle asidik ortamlarda yüksek bir korozyon direnci sağlamaktadır. Östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, bileşimlerinde % 12-25 Cr ve % 8-25 Ni içermektedirler ve antimagnetiktirler. Ancak yüksek krom ve nikel miktarı bu çeliklerin maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Çok iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler. Östenit oluşturu element nikel, demir-karbon alaşımlarından ferriti hemen hemen yok ederken östenit alanını genişletir. Karbon miktarı %0,03'den az ise karbür oluşmaz ve çelik oda sıcaklığında tamamen östenitik olarak kalır.

Çizelge 6.1. Kesme işleminde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

|          |                   |
|----------|-------------------|
| 304      | %                 |
| Karbon   | 0,08 maks.        |
| Mangan   | 2,0 maks.         |
| Fosfor   | 0,045 maks.       |
| Kükürt   | 0,030 maks.       |
| Silisyum | 0,75 maks.        |
| Krom     | 18,00-20,00 maks. |
| Nikel    | 8,00-12,00 maks.  |
| Azot     | 0,10 maks.        |
| Demir    | 65-71 maks.       |

### 6.3. Lazer Tezgahı

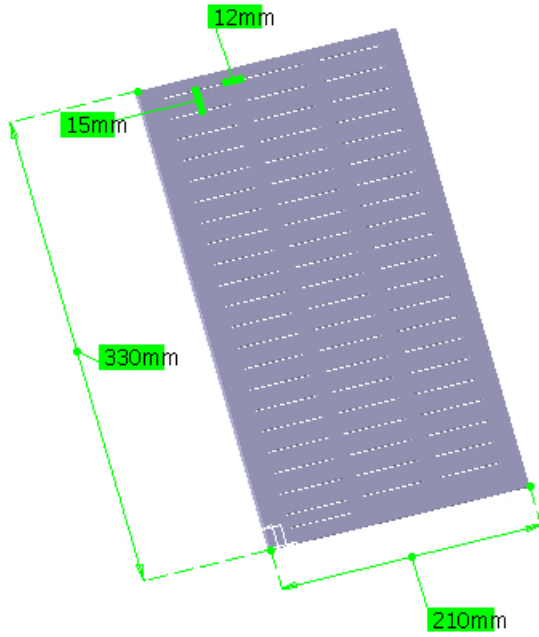
Kesme işlemi sırasında 4000 W gücündeki “Mazak HypearGear” CO<sub>2</sub> lazer tezgahı kullanılmıştır. Kesme işlemi Ostim-Ankara’da yerleşik olan SÖMEL LAZER firmasında gerçekleştirilmiştir. Tezgahın özellikleri çizelge 6.2’de belirtilmektedir.

Çizelge 6.2. Lazer tezgahı özellikleri

| Tezgah Modeli               |                 | Br    | HYPER GEAR 510    |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------------------|
| Osilatör Gücü               |                 | kW    | 2,5 / 4,0         |
| Maksimum İş Parçası Ölçüsü  |                 | mm    | 3000 x 1500       |
| Maksimum Yükleme Kapasitesi |                 | Kg    | 930               |
| X / Y / Z Eksen Hareketleri |                 | mm    | 3070 / 1545 / 100 |
| Eksen Hızları               |                 | m/dak | 120               |
| İvmelenme Değeri            |                 | G     | 3                 |
| Pozisyonlama Hassasiyeti    |                 | mm    | ± 0,01            |
| Tekrarlama Hassasiyeti      |                 | mm    | ± 0,005           |
| Kesme Kalınlığı             | Yumuşak Çelik   | mm    | 22 / 25           |
|                             | Paslanmaz Çelik | mm    | 9 / 15            |
|                             | Alüminyum       | mm    | 8 / 15            |

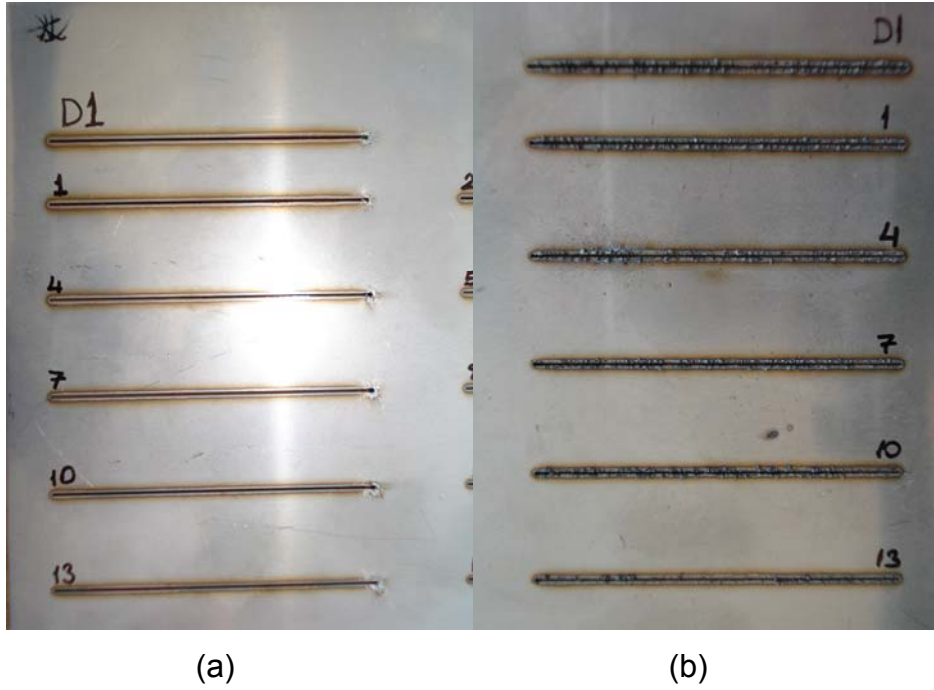
#### 6.4. Yöntem

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi belirlenen ölçülerde sırasıyla kesikler oluşturulmuştur. Toplam dört farklı kalınlıkta sac kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm’dir.



Şekil 6.1. Kullanılan malzeme ve kesik ölçüleri

Kesme işlemi sırasında CO<sub>2</sub> lazerinin oluşması için kullanılan gaz karışımı %71,7 CO<sub>2</sub> , %23,4 N<sub>2</sub> ve kalan kısım helyum gazından oluşmaktadır. İşlem sırasında %100 güç yoğunluğu, 7,5” lens, 1,5 mm çapında lüle kullanılarak, nitrojen gazıyla birlikte sürekli mod tipi seçilmiştir. Resim 6.1’de görüldüğü üzere yaklaşık 10 mm aralıklarla kesikler oluşturulmuş, daha sonra her bir kesik sac üzerinde numaralandırılmıştır. Her sac kalınlığı için 64 adet farklı parametrelili kesik oluşturulmuştur. Toplam 4 plakada 256 adet kesik elde edilmiştir.



Resim 6.1. Kesme işleminden görünüm (a) ön yüz (b) arka yüz

Kesme işleminden sonra öncelikle her kesik tek tek dijital fotoğraf makinesinde fotoğraflanarak, görsel muayene işlemi için hazırlanmıştır. Böylece 256 adet kesik için üst ve alt fotoğrafları elde edilmiştir.

Fotoğraflama işleminden sonra, numuneler tek tek giyotinde kesilerek, 256 adet dikdörtgen numune elde edilmiştir. Bu numuneler optik mikroskoba yerleştirilerek, kesiklerin üst görünüm fotoğrafları optik mikroskopta x50 büyütme kullanılarak çekilmiştir. Elde edilen fotoğraflardan kesme aralığı ölçümleri yapılmıştır. Her kesik için çeşitli noktalardan on'ar adet ölçüm alınmıştır. Daha sonra bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Kesme aralığı sonuçları EK-1'de verilmiştir.

Kesik aralığı ölçümünden sonra yan yüzeylerden de ölçümler alınarak dross yükseklikleri belirlenmiştir. 1mm kalınlık için ölçümlerde optik mikroskop ve minimum büyütme değeri olan x50 büyütme kullanılmıştır. Diğer kalınlıklarda ölçülecek mesafe görüntü dışına taşıdığı için 2mm kalınlıkta optik ölçüm cihazı, 3mm ve 4mm kalınlıklarda kumpas kullanılmıştır. Dross yüksekliği

ölçüm sonuçları EK-2’de verilmiştir. Elde edilen ölçüm değerlerinden kesme aralığı ve dross yüksekliği ile ilgili grafikler çıkarılmış, parametrelerin etkisi incelenmiştir. Son olarak 3mm ve 4mm kalınlıklarda 4’er adet numunenin ITAB’ı incelenmiştir.

### 6.5. Parametreler

İş parçası parametresi olarak, kalınlık ve lazer parametreleri olarak da, lazer gücü, kesme hızı ve lazer puls frekansı seçilmiştir (Çizelge 6.3)

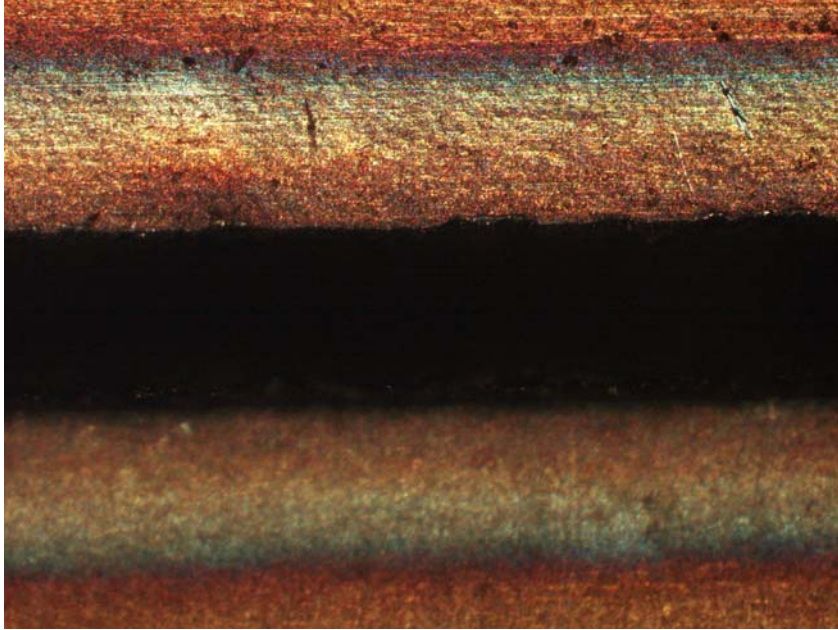
Çizelge 6.3. Her bir sac için parametre uygulama tablosu

| Güç (W) | Hız (mm/dak) | Frekans (Hz) | Kesik No. | Güç (W) | Hız (mm/dak) | Frekans (Hz) | Kesik No. |
|---------|--------------|--------------|-----------|---------|--------------|--------------|-----------|
| 1000    | 200          | 100          | 1         | 1400    | 200          | 100          | 33        |
|         |              | 500          | 2         |         |              | 500          | 34        |
|         |              | 1000         | 3         |         |              | 1000         | 35        |
|         |              | 1500         | 4         |         |              | 1500         | 36        |
|         | 250          | 100          | 5         |         | 250          | 100          | 37        |
|         |              | 500          | 6         |         |              | 500          | 38        |
|         |              | 1000         | 7         |         |              | 1000         | 39        |
|         |              | 1500         | 8         |         |              | 1500         | 40        |
|         | 300          | 100          | 9         |         | 300          | 100          | 41        |
|         |              | 500          | 10        |         |              | 500          | 42        |
|         |              | 1000         | 11        |         |              | 1000         | 43        |
|         |              | 1500         | 12        |         |              | 1500         | 44        |
|         | 350          | 100          | 13        |         | 350          | 100          | 45        |
|         |              | 500          | 14        |         |              | 500          | 46        |
|         |              | 1000         | 15        |         |              | 1000         | 47        |
|         |              | 1500         | 16        |         |              | 1500         | 48        |
| 1200    | 200          | 100          | 17        | 1600    | 200          | 100          | 49        |
|         |              | 500          | 18        |         |              | 500          | 50        |
|         |              | 1000         | 19        |         |              | 1000         | 51        |
|         |              | 1500         | 20        |         |              | 1500         | 52        |
|         | 250          | 100          | 21        |         | 250          | 100          | 53        |
|         |              | 500          | 22        |         |              | 500          | 54        |
|         |              | 1000         | 23        |         |              | 1000         | 55        |
|         |              | 1500         | 24        |         |              | 1500         | 56        |
|         | 300          | 100          | 25        |         | 300          | 100          | 57        |
|         |              | 500          | 26        |         |              | 500          | 58        |
|         |              | 1000         | 27        |         |              | 1000         | 59        |
|         |              | 1500         | 28        |         |              | 1500         | 60        |
|         | 350          | 100          | 29        |         | 350          | 100          | 61        |
|         |              | 500          | 30        |         |              | 500          | 62        |
|         |              | 1000         | 31        |         |              | 1000         | 63        |
|         |              | 1500         | 32        |         |              | 1500         | 64        |

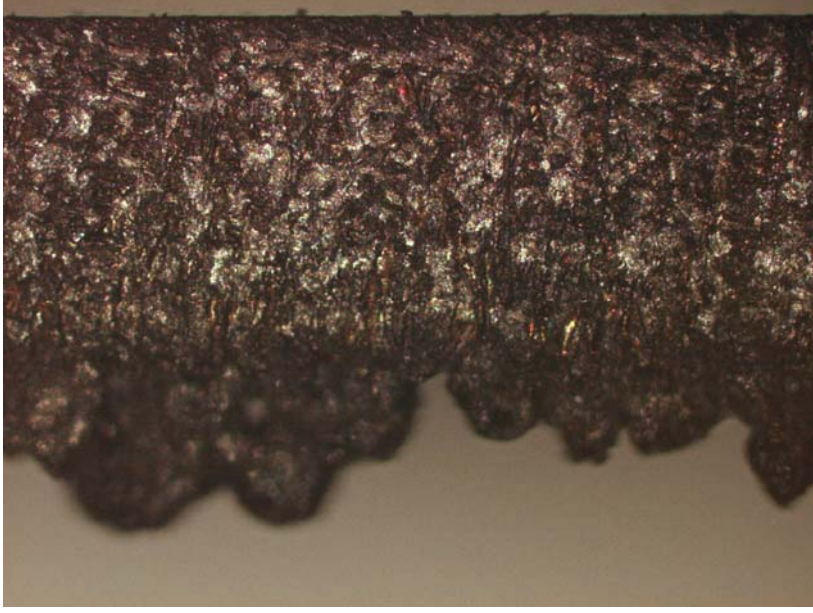
Çizelge 6.1'deki tablo değerleri uygulanarak her bir sac kalınlığı için toplam 64 adet farklı parametrede lazer ile kesme yapılmıştır. Dört adet sac kalınlığı için toplam 256 adet kesik elde edilmiştir. Kesikleri belirlemek için her bir sac üzerinde kesikler 1'den 64'e kadar markalanmıştır. Her sacdaki kesik numarası aynı lazer gücünü, kesme hızını ve lazer pulse frekansını belirtmektedir. Örneğin Kesik No.1, her kalınlık için 1000 W lazer gücünü, 200 mm/dak kesme hızını, 100 Hz lazer puls frekansını göstermektedir.

## 6.6. Uygulama

Dört farklı sac kalınlığı için elde edilen toplam 256 adet kesğin optik mikroskopta x50 büyütme ile kesik üst ve yan yüzeyleri Resim 6.2 ve Resim 6.3.'te olduğu gibi fotoğraflanmıştır.

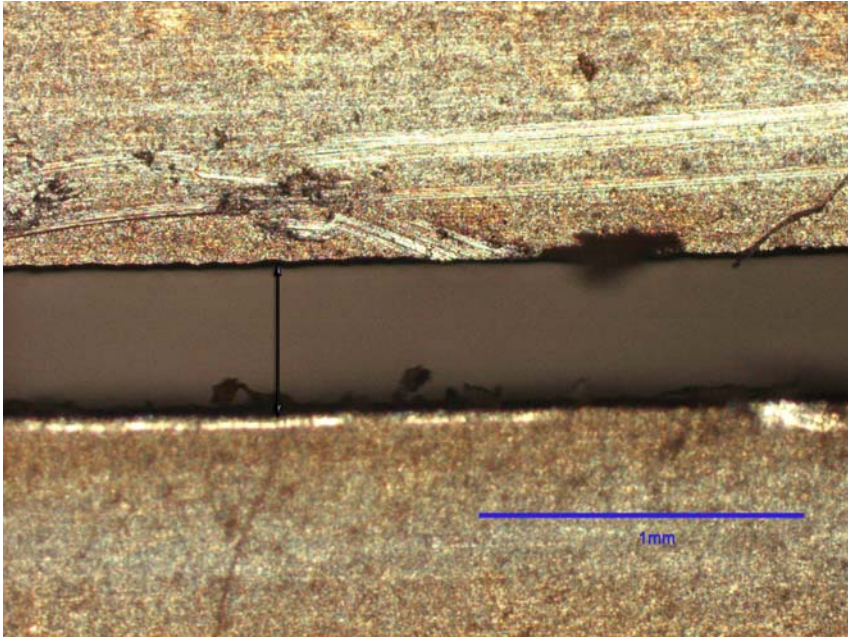


Resim 6.2. Üst görünüş x50 büyütme  
(1mm, 1000W, 200mm/dak, 100Hz)



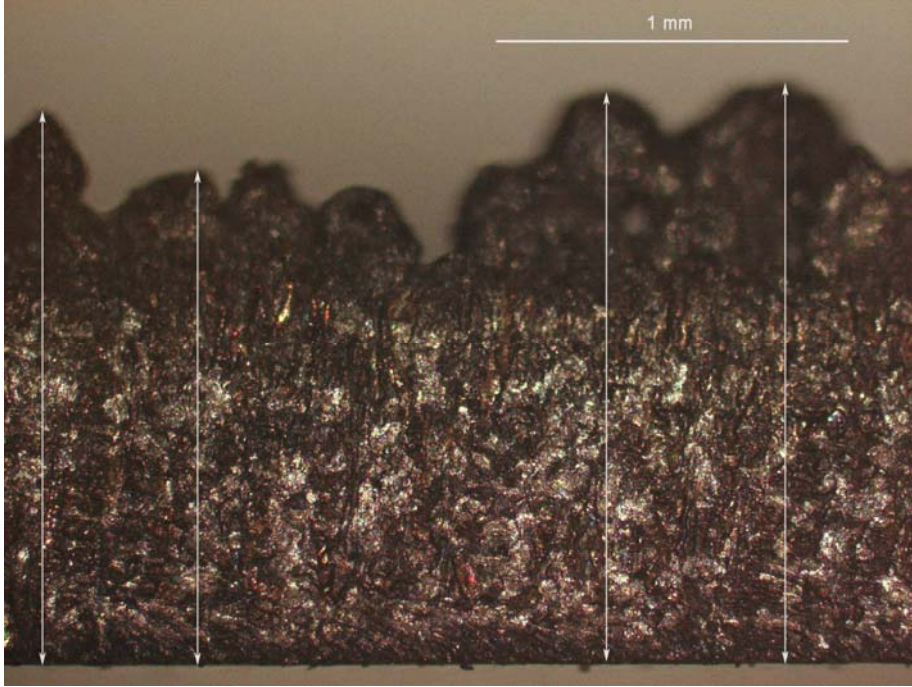
Resim 6.3. Yan görünüş x50 büyütme  
( 1mm, 1000W, 200mm/dak, 100Hz)

Resim 6.4'te görüldüğü gibi her kesik için 10 adet kesme aralığı ölçümü alınmıştır. Bu on ölçümün ortalaması alınarak her bir parametre için ortalama kesme aralığı değeri bulunmuştur (EK-1).



Resim 6.4. Kesik aralığının ölçümü

Resim 6.5'te görüldüğü üzere 1mm kalınlık için dross yüksekliği ölçümü için optik mikroskop ve photoshop programından yararlanılarak çeşitli bölgelerden 10 adet ölçüm alınarak, bunların ortalamasından dross yüksekliği her bir parametre için belirlenmiştir (EK-2).



Resim 6.5. Dross yüksekliği ölçümü

2mm kalınlık için Dorsey Gage Company ürünü olan Benchmark 16H optik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Resim 6.6). Cihaz ile her numuneden on farklı yükseklik ölçümü alınmış, bu ölçümlerin ortalaması alınarak her bir parametre için dross yüksekliği elde edilmiştir (EK-2).



Resim 6.6. Dross yüksekliği ölçümü için kullanılan optik ölçüm cihazı

3mm ve 4mm kalınlıklar için ölçümler 0,01 mm hassasiyetteki kumpas ile yapılmıştır. Her bir parametre için alınan ölçümler EK-2’de verilmiştir. Daha sonra optik mikroskop kullanılarak belirlenen numuneler ITAB tespiti için önce 600 meş, sonra 1000 meş zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra yüzeyin daha pürüzsüz hale gelmesi için 6  $\mu\text{m}$  ve daha sonra 3  $\mu\text{m}$  aşındırıcı ile son parlatma işlemi yapılmıştır. %40 HCl, %30 HNO<sub>3</sub> ve %40 H<sub>2</sub>O’dan oluşan dağlayıcı ile 10 dakika bekletilen numunelerden optik mikroskop yardımıyla fotoğraflar elde edilerek, ITAB’lar belirlenmiştir. Oyuk oluşumlarının incelenmesi için yan yüzey fotoğrafları çekilmiştir. Sonuç olarak kesme kalitesini belirlemek amacıyla kesme aralığı, dross yükseklikleri, ITAB ve kenar oyuklaşmalarının kesme parametreleri ile ilişkisi incelenmiştir.

## 7. DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

### 7.1. Lazer Kesme Kalitesi

Lazer kesiğin kalitesi şu şekilde tanımlanmıştır (Şekil 7.1) [26]:

#### Kesme aralığı:

Lazer ile kesmede kesik genişliğidir. Kesimlerde dar bir kesme aralığı beklenir. Dar kesme aralıkları daha kaliteli kesme yapıldığının göstergelerindendir [26].

#### Isı tesiri altında kalmış bölge (ITAB):

ITAB kesme aralığına bitişik, kesme sırasında ısıdan etkilenen bölgedir. ITAB'ın genişliği kesim kalitesini belirleyen faktörlerdendir [26].

#### Kenar oyuklaşmaları:

Kesme yüzeyinde oluşan oyuklardır. Bu oyuklar kesme kalitesini etkileyen önemli etkenlerdendir. Oyukların sıklığı ve derinliği yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Kaliteli bir kesmede yüzey pürüzlülüğünün düşük olması beklenir [26].

#### Dross yapışması:

Kesme işlemi sırasında ortamdan uzaklaştırılamayan erimiş metal kesik kenarına yapışır. Kesik kenarına yapışan bu metal daha çok ITAB oluşmasına neden olur. Kaliteli bir kesmede drossun olmaması veya az olması beklenmektedir [26].

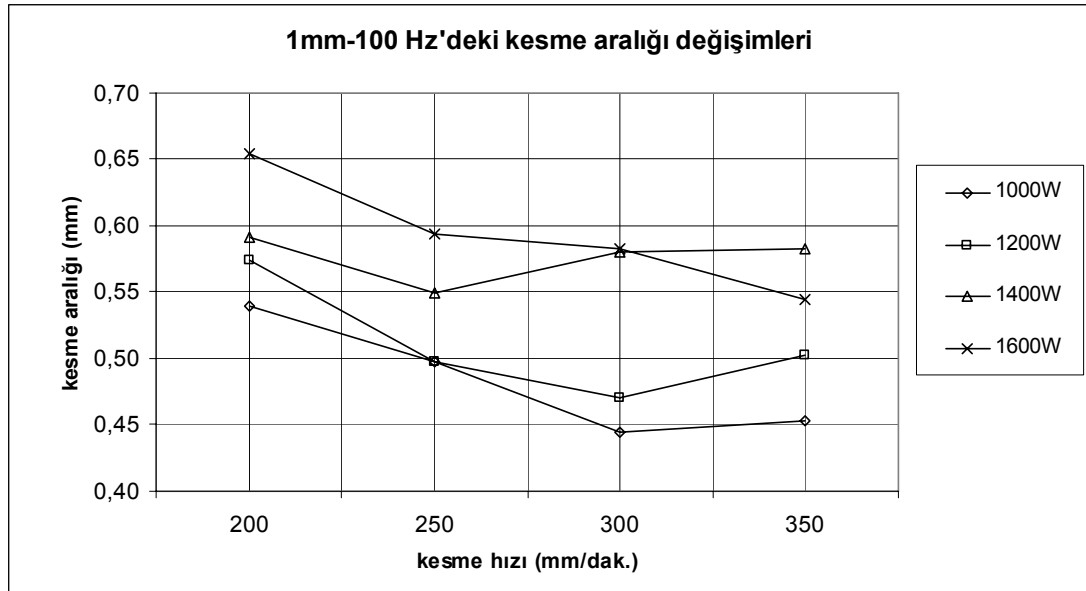


### 7.3. Kesme Aralığının Parametrelere Bağlı Değişimi

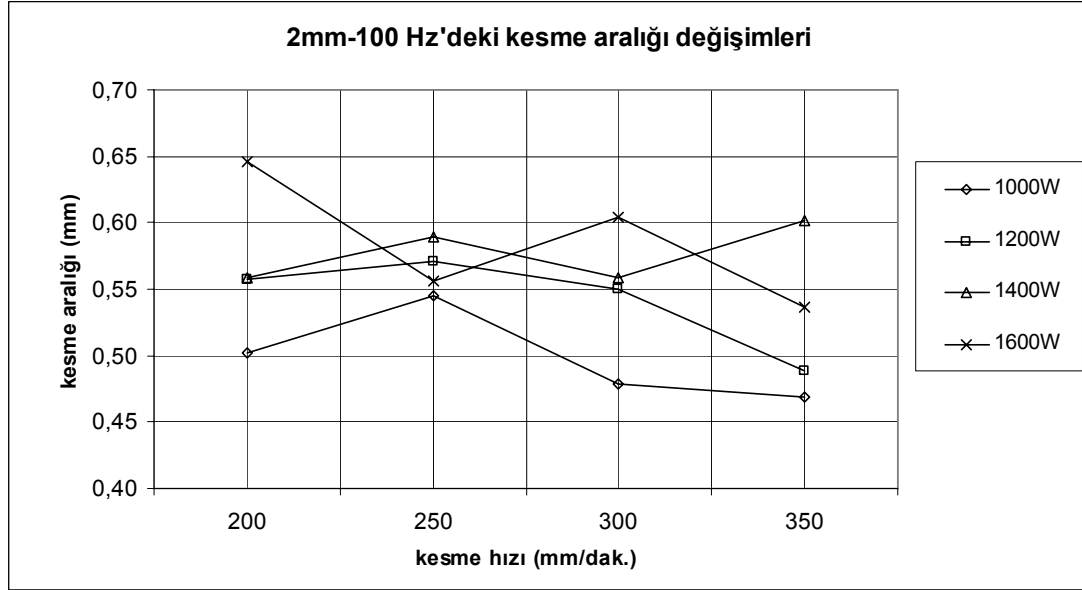
Kesme aralığının parametrelere bağlı değişimini incelemek için dört parametreden üçü sabit tutulmuş diğer parametre değiştirilmiştir. Grafiklerde x eksenini kesme aralığı değerlerini gösterirken, y eksenini sırasıyla kesme hızı, lazer puls frekansı ve malzeme kalınlığını göstermektedir. Grafiklerdeki seriler lazer gücünü belirtmektedir.

#### 7.3.1. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi

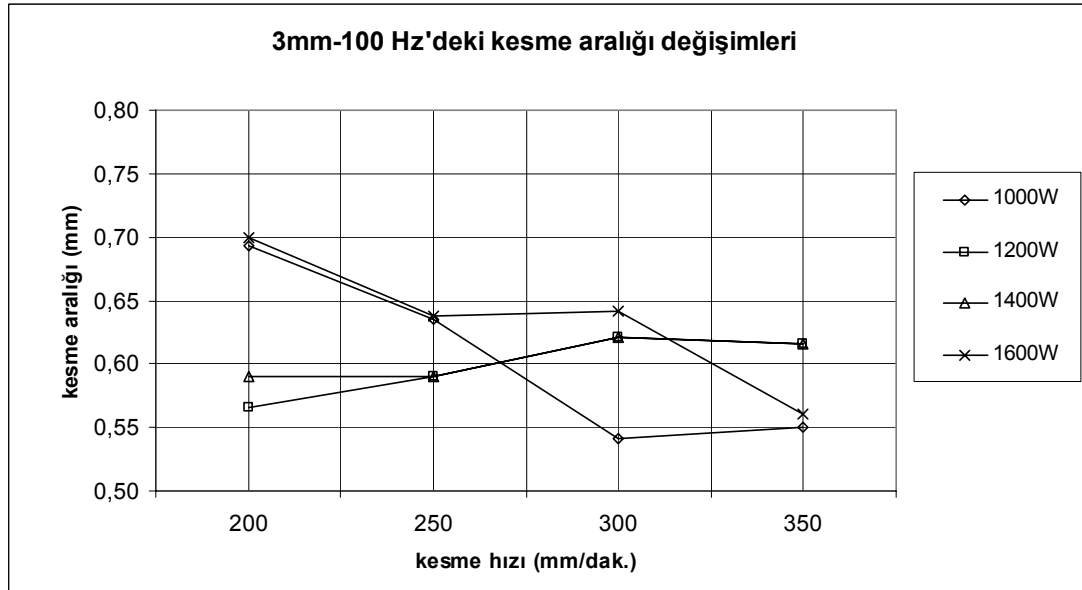
İlk olarak lazer puls frekansı ve malzeme kalınlığı sabit tutularak kesme aralığının lazer gücüne ve kesme hızına bağlı değişimleri incelenmiştir. Şekil 7.2 – Şekil 7.5'te 100 Hz lazer puls frekansı ve kalınlığın sabit tutulduğu kesme hızı - kesme aralığı - lazer gücü grafikleri görülmektedir.



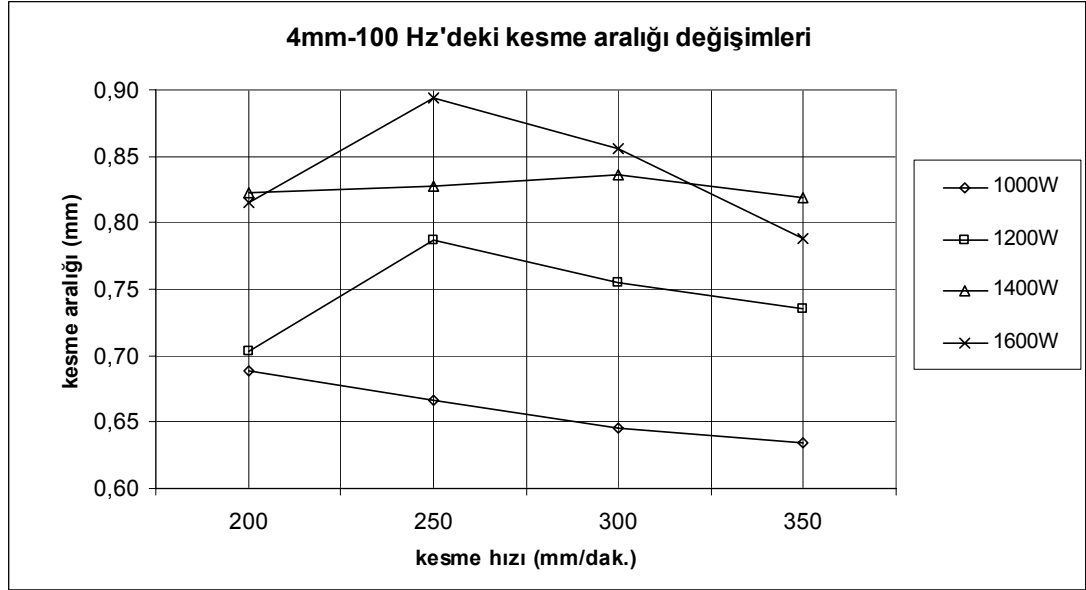
Şekil 7.2. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 100Hz)



Şekil 7.3. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi  
(2mm, 100Hz)



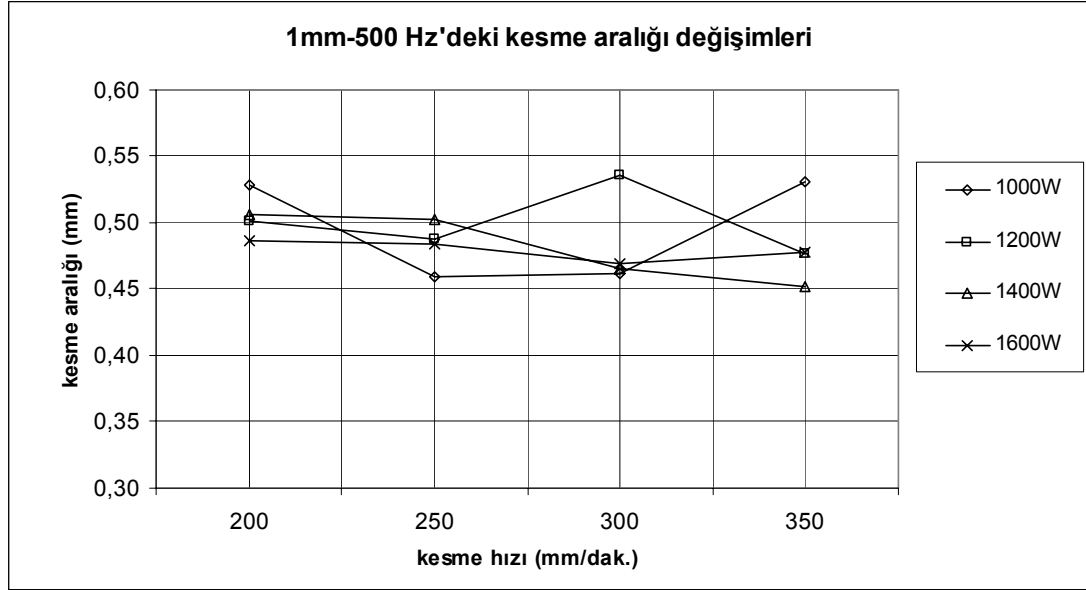
Şekil 7.4. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 100Hz)



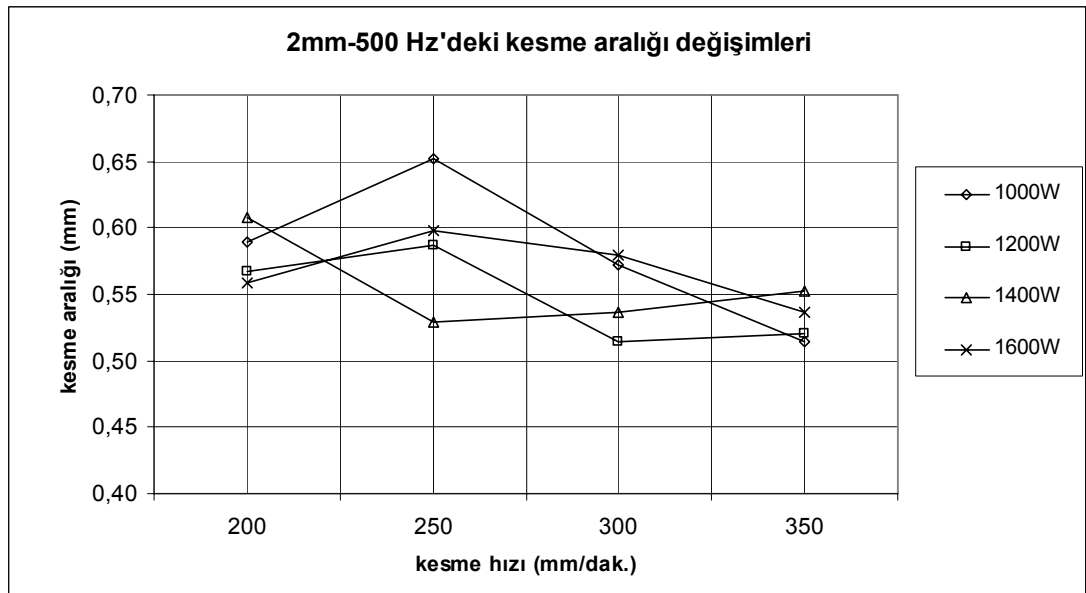
Şekil 7.5. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (4mm, 100Hz)

100 Hz sabit lazer puls frekansı ve sabit kalınlıktaki sonuçları incelediğimizde 1400 W lazer gücündeki 250 mm/dak hızdan, 300 mm/dak hıza geçiş ve 1200 W lazer gücündeki 300 mm/dak hızdan, 350 mm/dak hıza geçişlerde kesme aralığı artışı gözlenmiştir, fakat diğer tüm incelemelerde dört lazer gücü değeri için kesme hızının artması ile kesme aralığında bir azalma görülmektedir. Genelleme yapılırsa kesme hızı artışı, kesme aralığını azaltmıştır. Ayrıca güç değişimi incelendiğinde, kesme aralığı 1600 W lazer gücü için en fazla, 1000 W için en az çıkmıştır. Artan lazer gücü ısı girdisini arttırdığı için kesme aralığında artış oluşmaktadır. Lazer gücünün artışı, kesme aralığını artırmıştır.

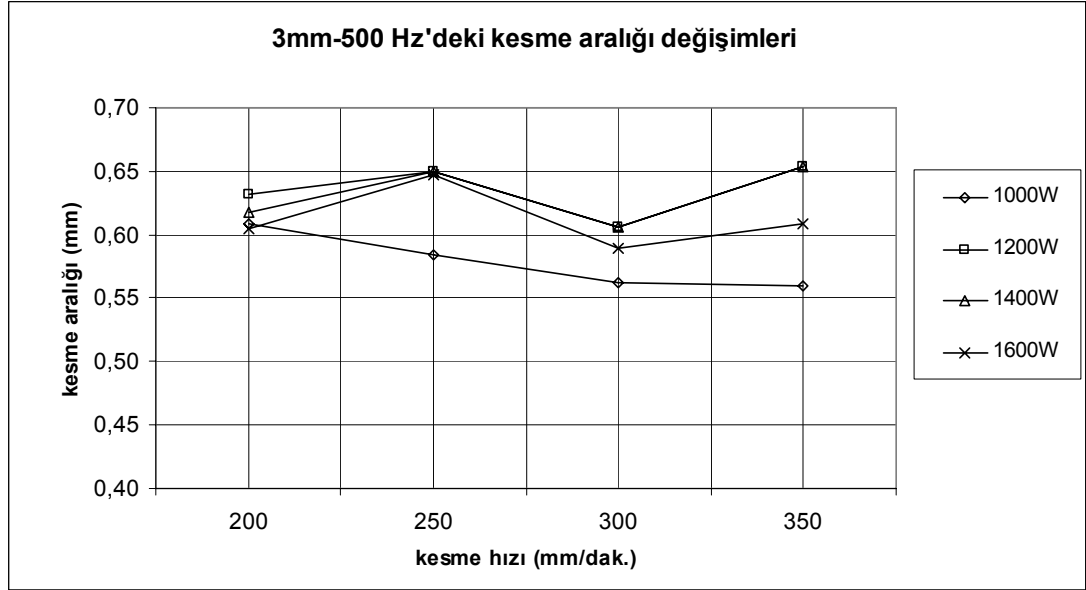
Şekil 7.6 – Şekil 7.17’de lazer puls frekansının sırasıyla 500 Hz, 1000 Hz ve 1500 Hz’de sabit tutulduğu kesme hızı - kesme aralığı - lazer gücü grafikleri mevcuttur.



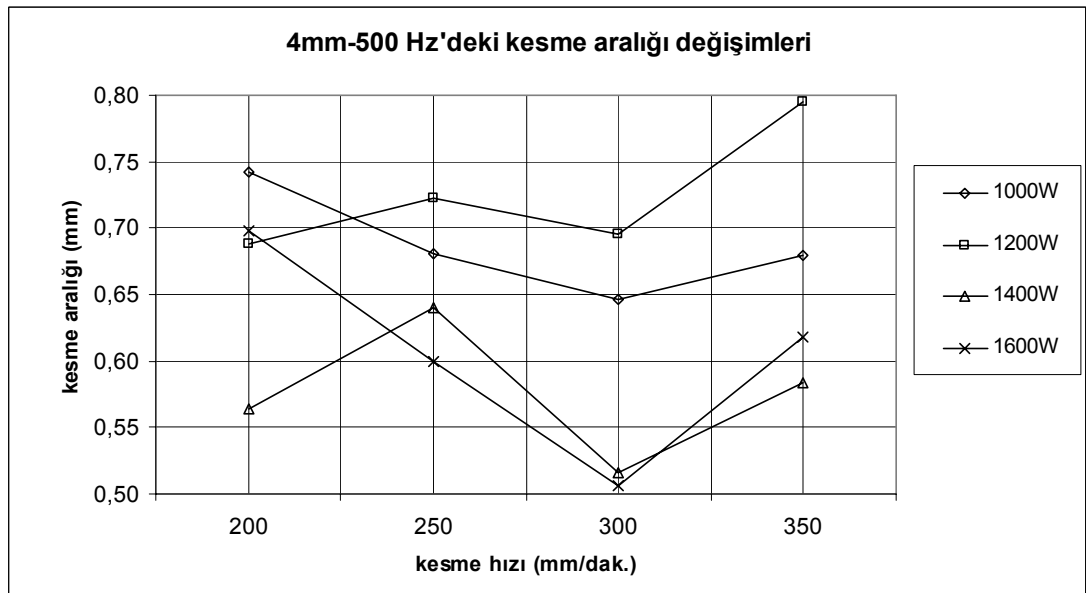
Şekil 7.6. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 500Hz)



Şekil 7.7. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (2mm, 500Hz)



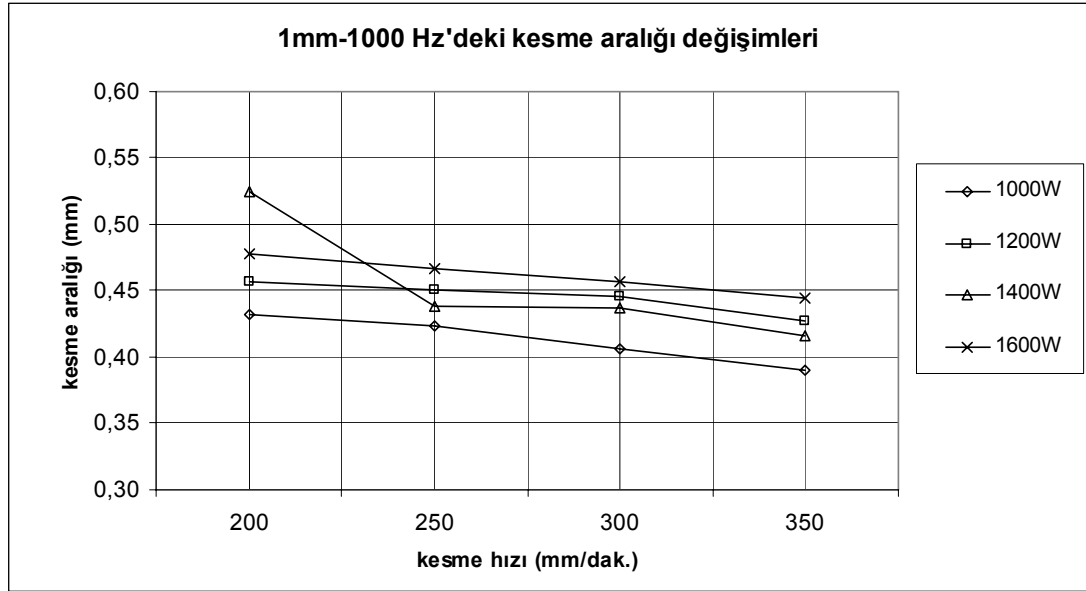
Şekil 7.8. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 500Hz)



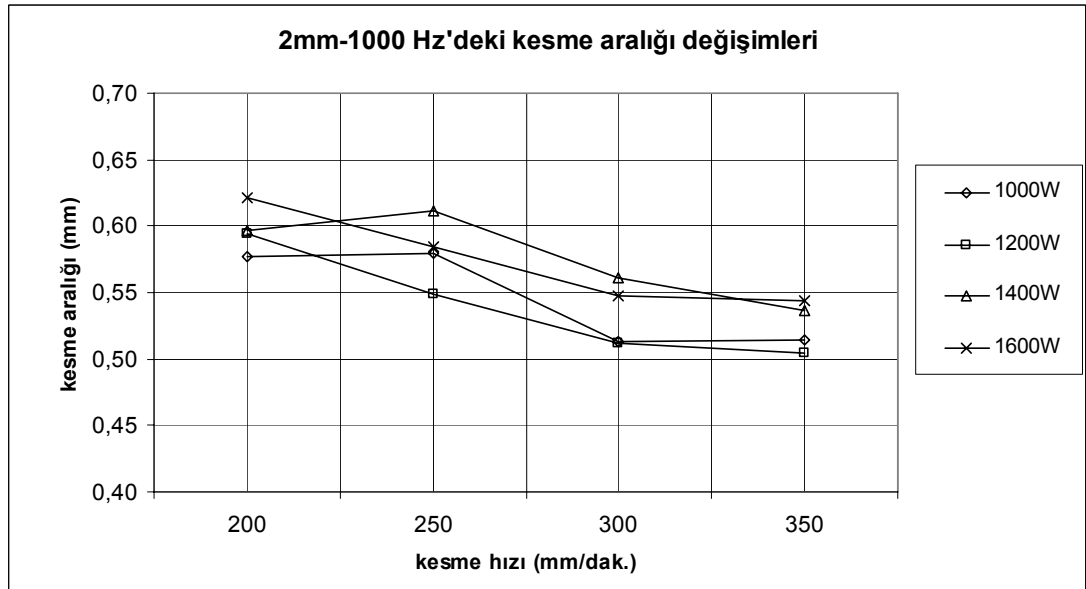
Şekil 7.9. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi  
(4mm, 500Hz)

500 Hz lazer puls frekansının sabit tutulduğu kesimlerde 1 mm, 2 mm, 3 mm kalınlıklar için 100 Hz lazer puls frekansındaki benzer sonuçlar görülmüştür. 4 mm kalınlıkta artan kesme hızı ile kesme aralıklarında artışlar olmuştur.

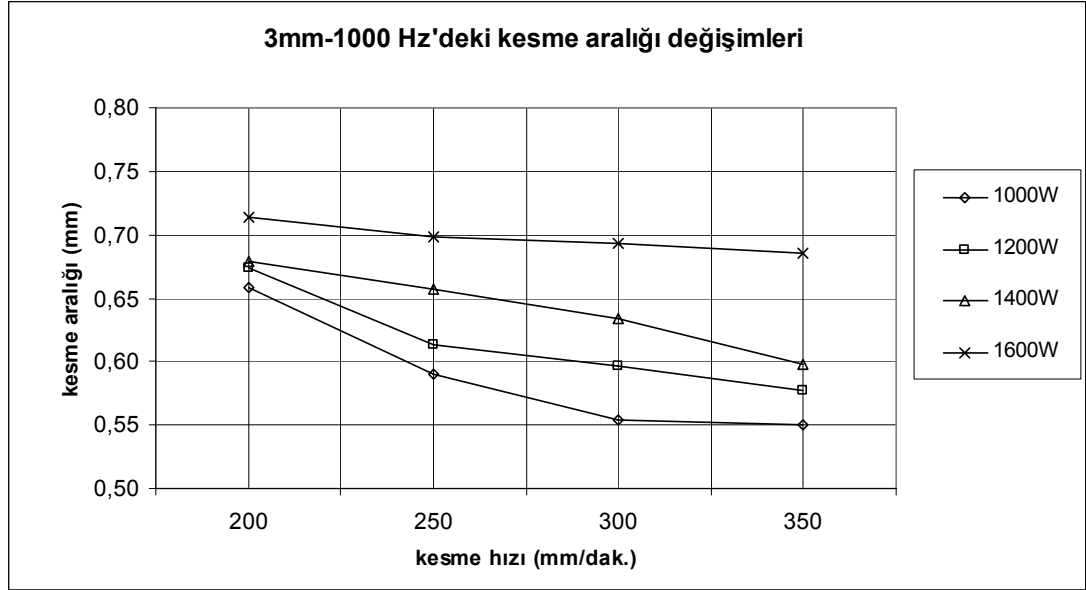
Bunun sebebinin 4 mm kalınlıktaki kesme işleminin yapıldığı malzeme yüzeyindeki bozukluklar veya yansımalar olduğu düşünülmektedir.



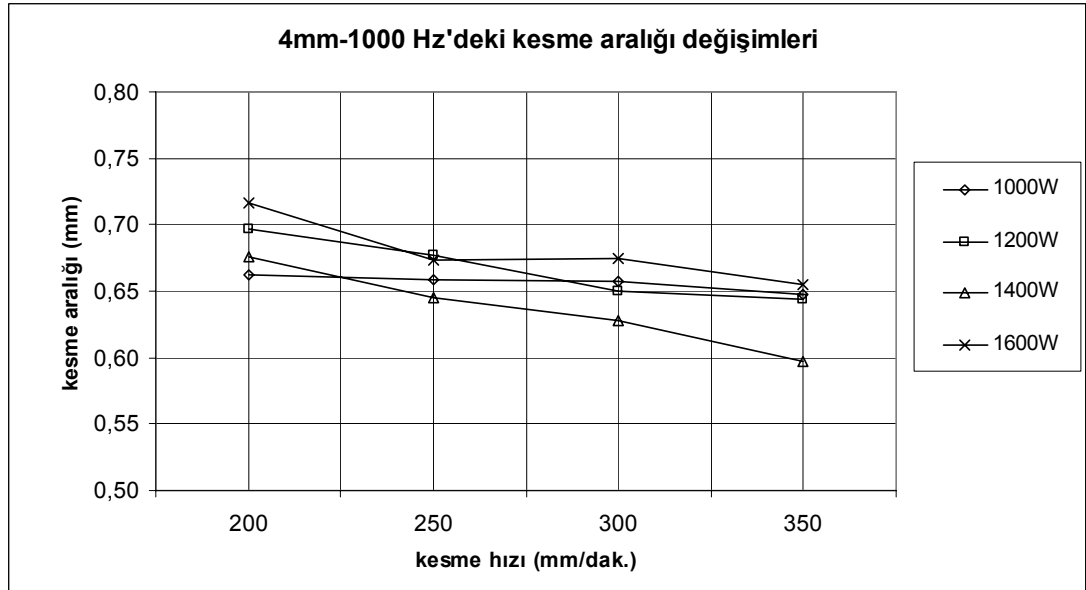
Şekil 7.10. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 1000Hz)



Şekil 7.11. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (2mm, 1000Hz)



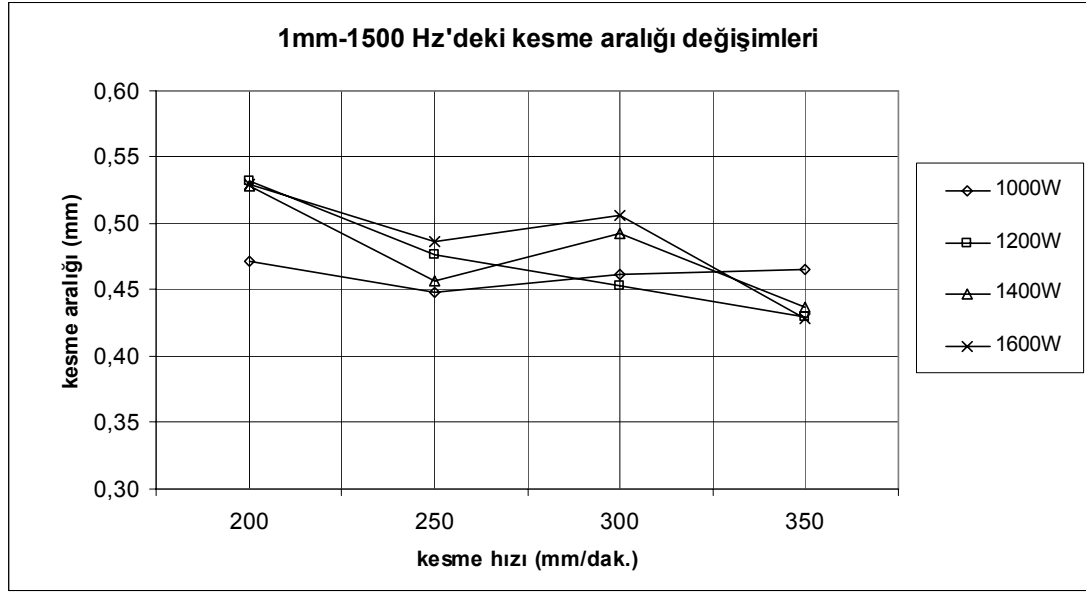
Şekil 7.12. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (3mm, 1000Hz)



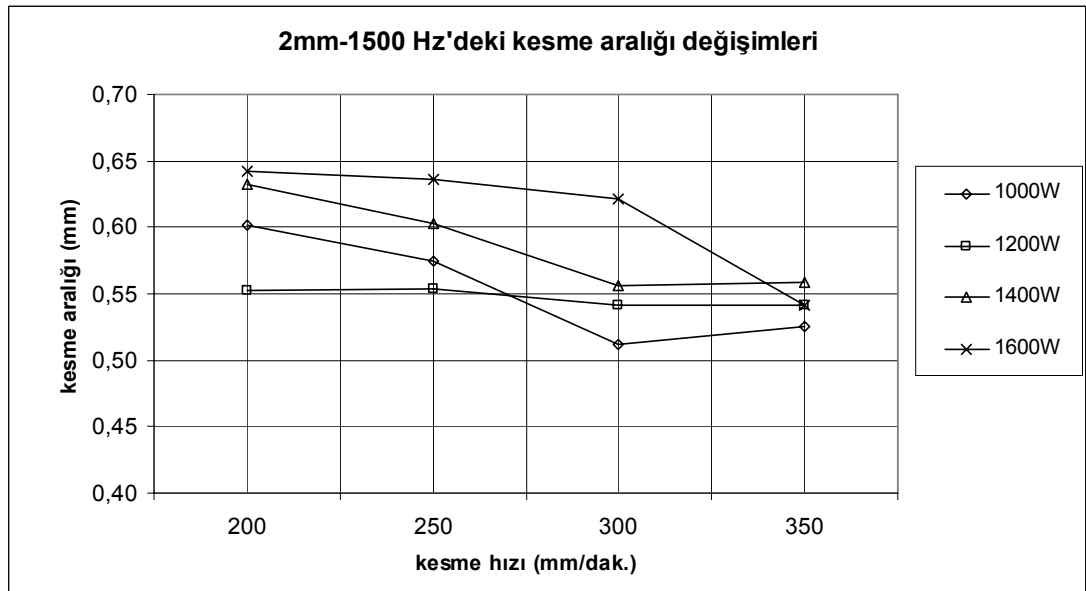
Şekil 7.13. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (4mm, 1000Hz)

1000 Hz lazer puls frekansının sabit tutulduğu kesimlerde yapılan incelemeler kesme hızının artması ile kesme aralığının azaldığını göstermektedir. Lazer gücündeki artış, kesme aralığında artışa sebep olmuştur. Kesme aralıkları incelendiğinde en yüksek değer 1600 W'da, en

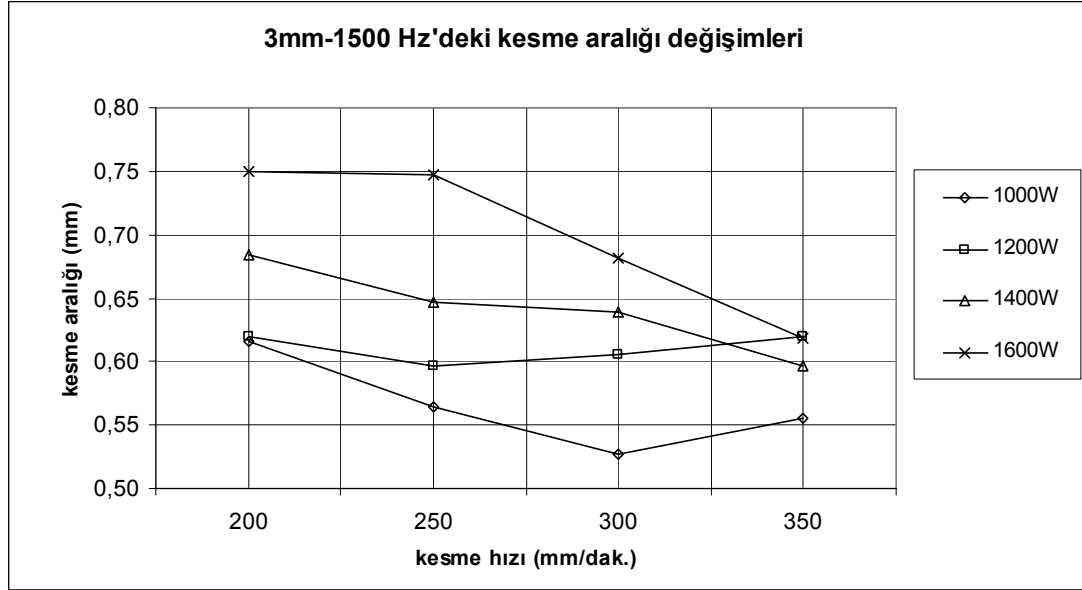
düşük değer 1000 W'da oluşmuştur. Lazer gücünü 1600 W'dan 1000 W'a azaltırken kesme aralığı da azalmıştır. Kesme aralığı lazer gücünün artması ile artmaktadır.



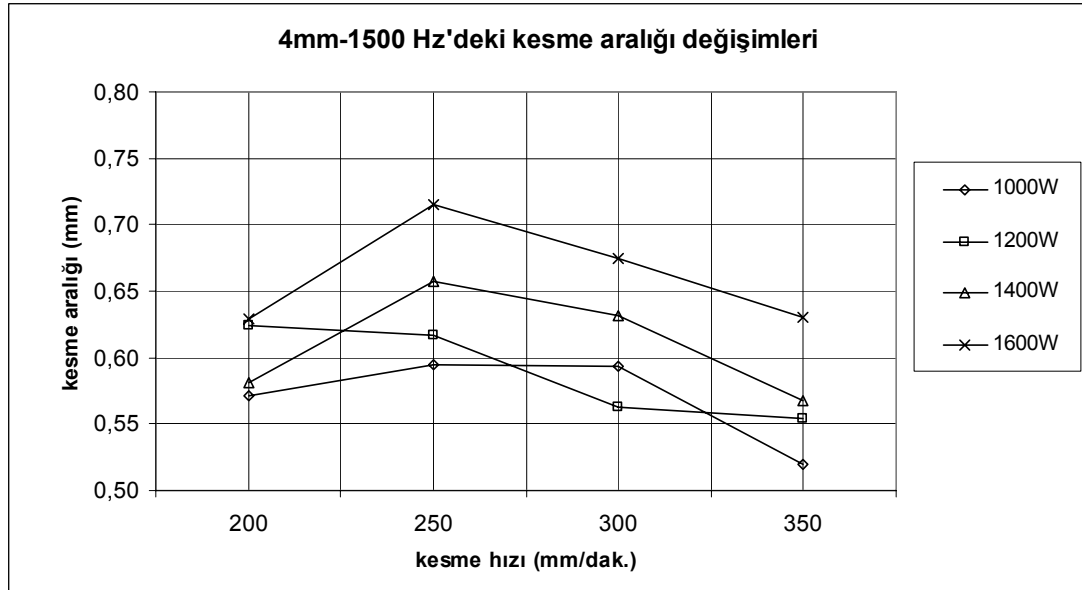
Şekil 7.14. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 1500Hz)



Şekil 7.15. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (2mm, 1500Hz)



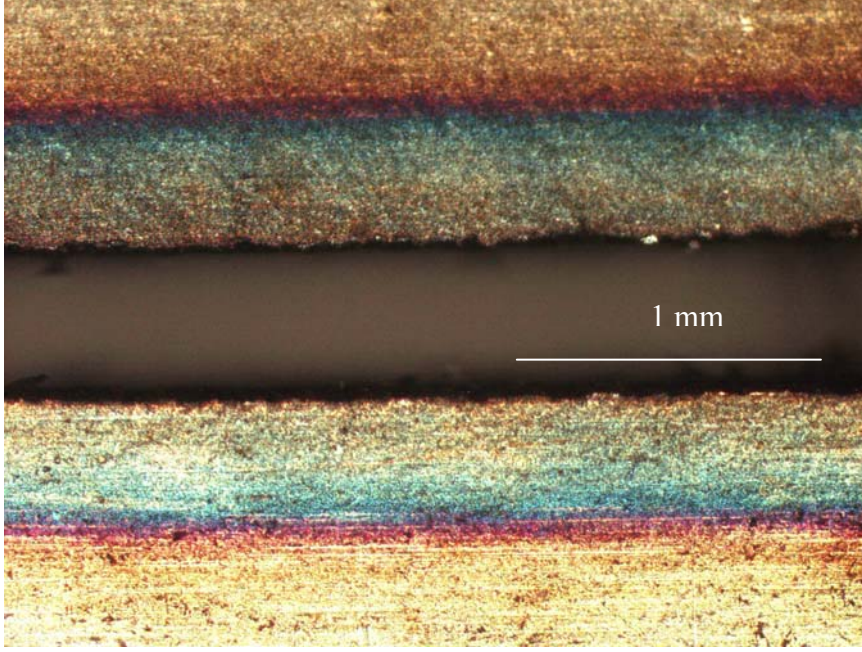
Şekil 7.16. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (3mm-1500Hz)



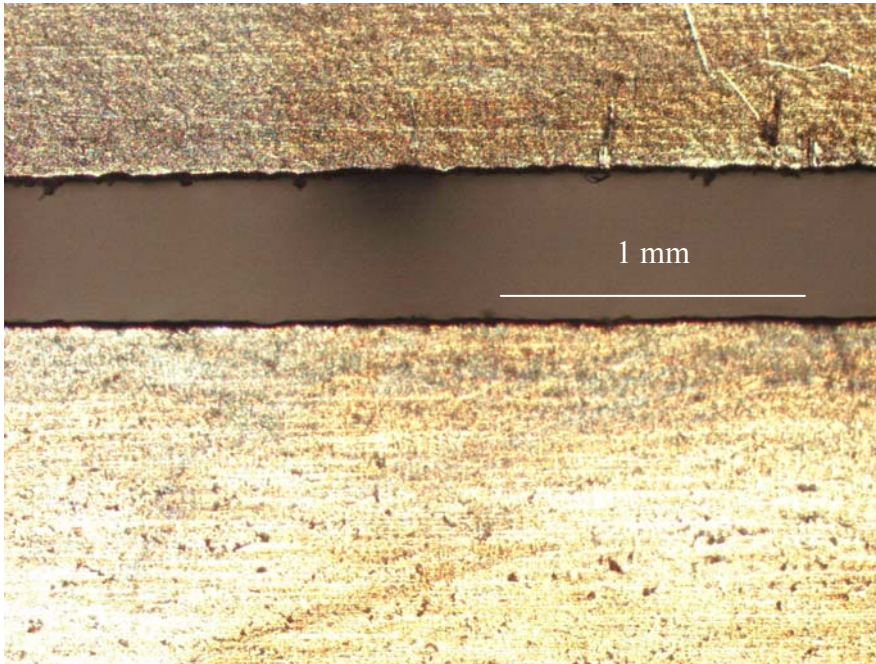
Şekil 7.17. Kesme aralığının kesme hızı ve güce bağlı değişimi (4mm, 1500Hz)

100 Hz, 500 Hz ve 1000 Hz lazer puls frekansında elde edilen sonuçlar ile 1500 Hz'de elde edilen sonuçlar benzerdir.

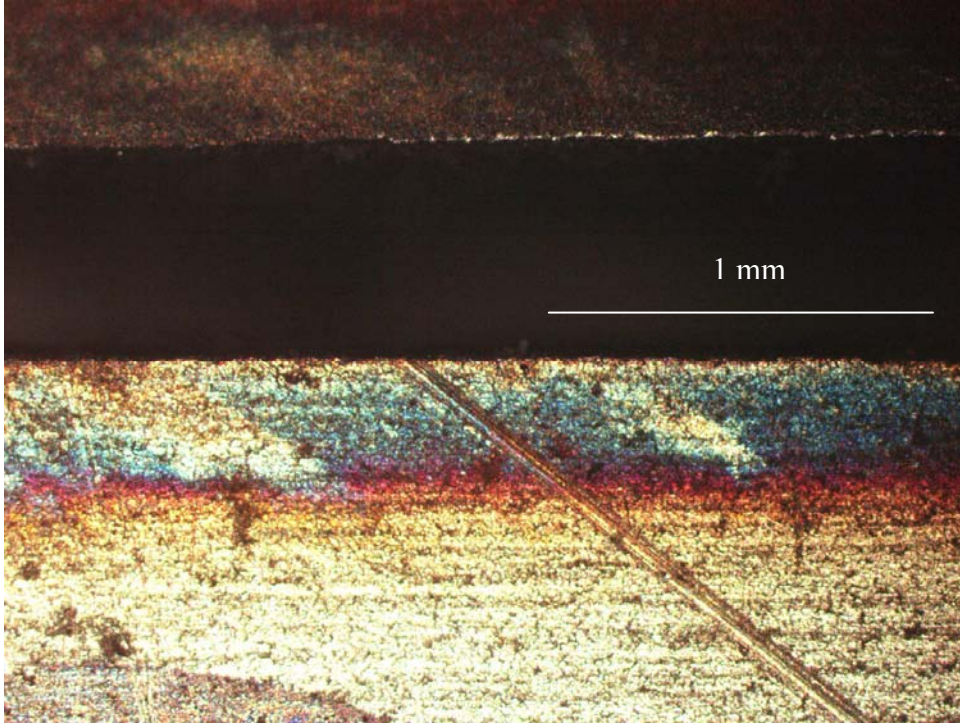
Resim 7.1 - Resim 7.8’de sırasıyla her kalınlık için en düşük ve en yüksek kesme aralığındaki kesiklerin fotoğrafları görölmektedir.



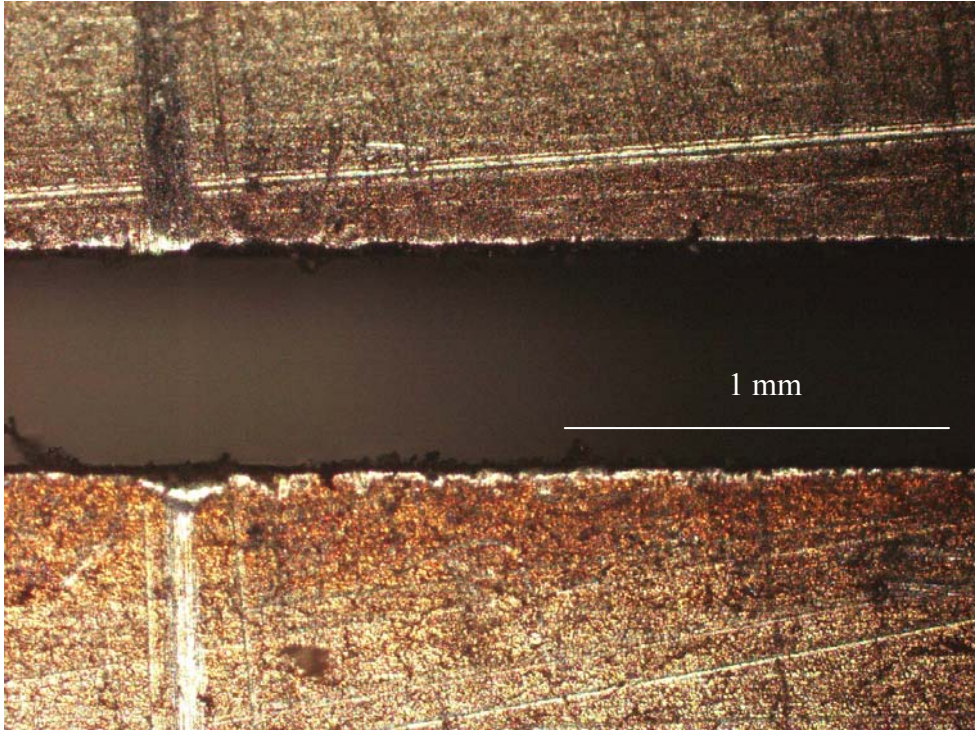
Resim 7.1. Kesik üst fotoğrafı 1mm, 1000W, 350mm/dak, 1000Hz (x50 büyütme)



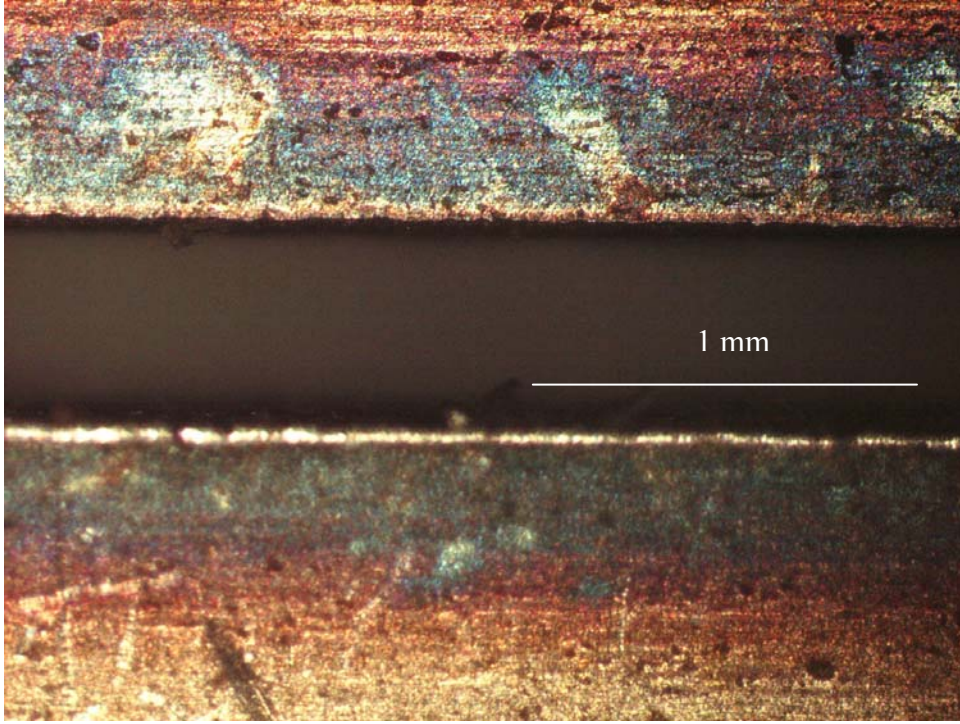
Resim 7.2. Kesik üst fotoğrafı 1mm, 1600W, 200mm/dak, 1000Hz (x50 büyütme)



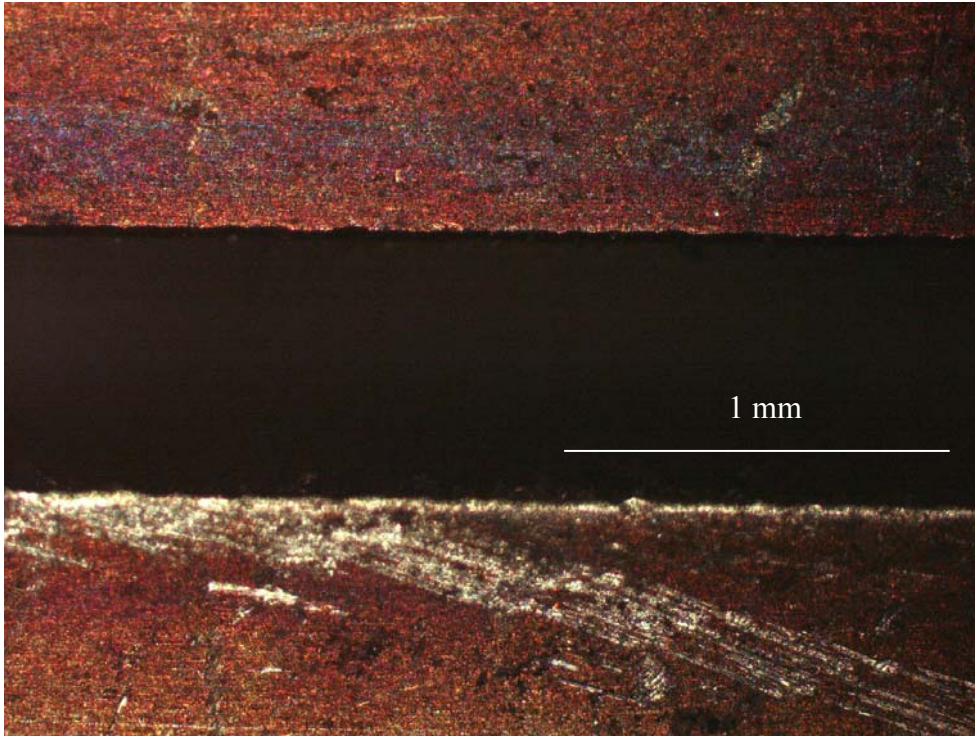
Resim 7.3. Kesik üst fotoğrafı 2mm, 1000W, 350mm/dak, 100Hz  
(x50 büyütme)



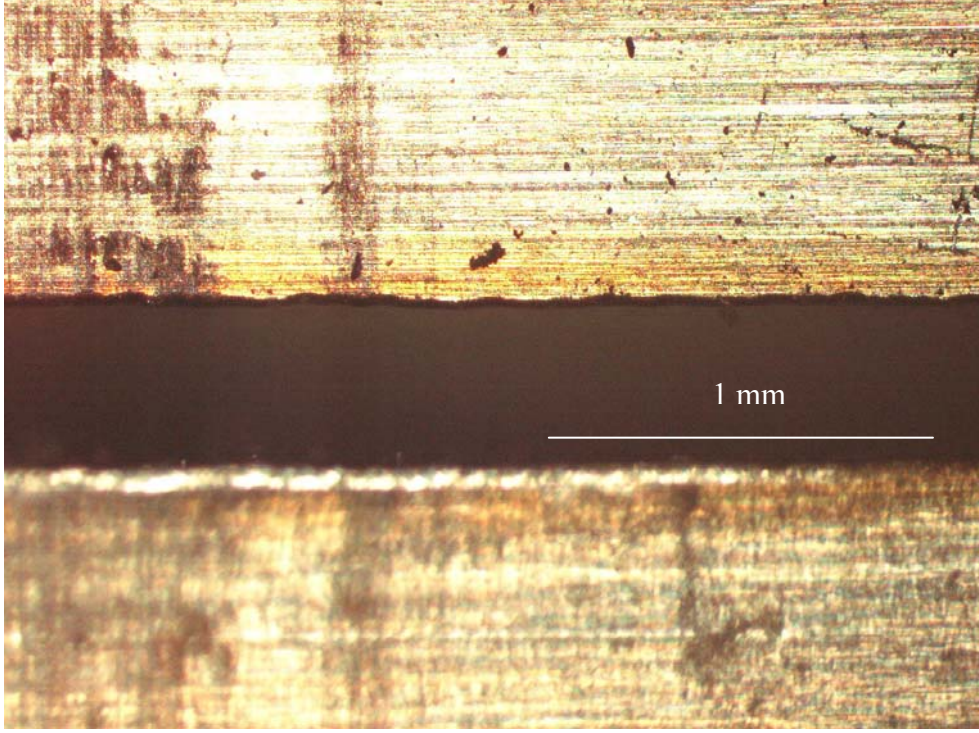
Resim 7.4. Kesik üst fotoğrafı 2mm, 1600W, 200mm/dak, 1500Hz  
(x50 büyütme)



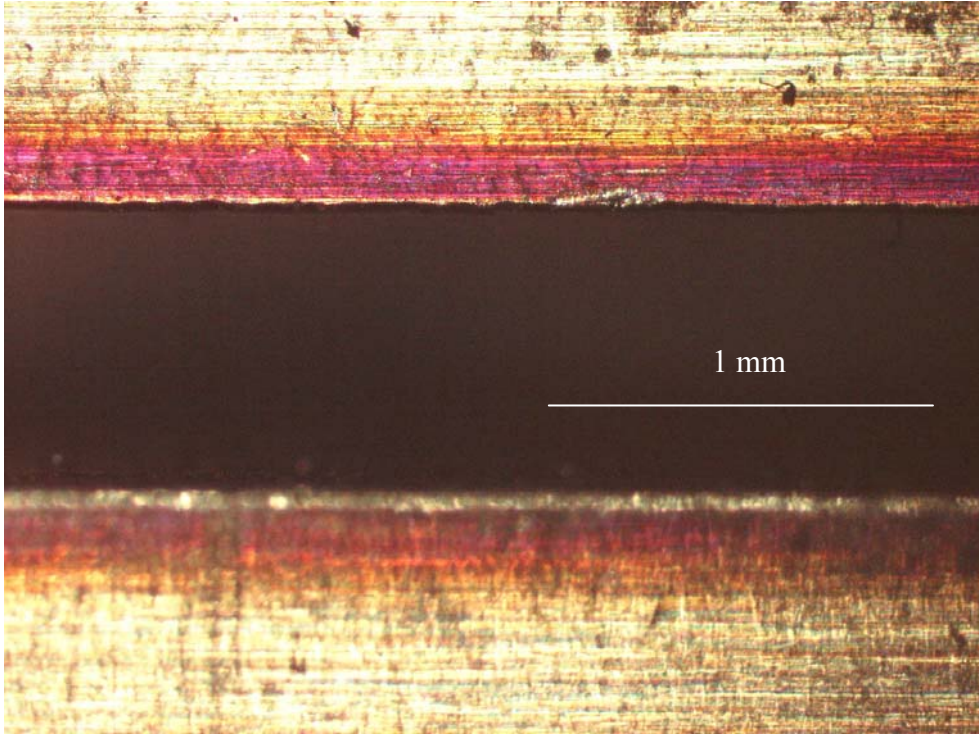
Resim 7.5. Kesik üst fotoğrafı 3mm, 1000W, 300mm/dak, 1500Hz  
(x50 büyütme)



Resim 7.6. Kesik üst fotoğrafı 3mm, 1600W, 200mm/dak, 1500Hz  
(x50 büyütme)



Resim 7.7. Kesik üst fotoğrafı 4mm, 1600W, 300mm/dak, 500Hz  
(x50 büyütme)

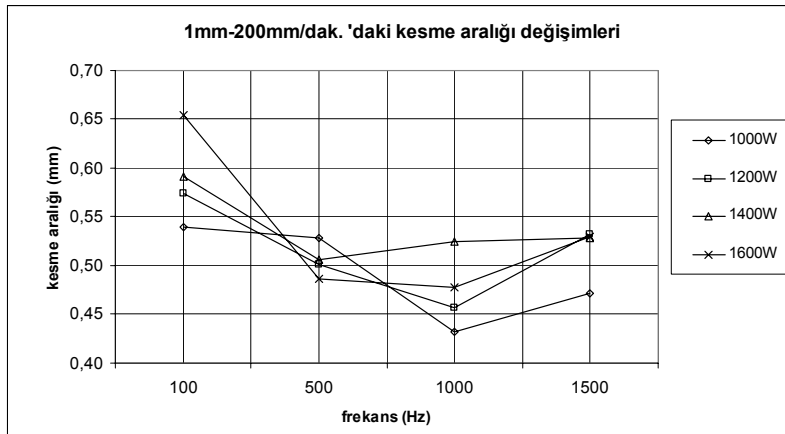


Resim 7.8. Kesik üst fotoğrafı 4mm, 1600W, 250mm/dak, 100Hz  
(x50 büyütme)

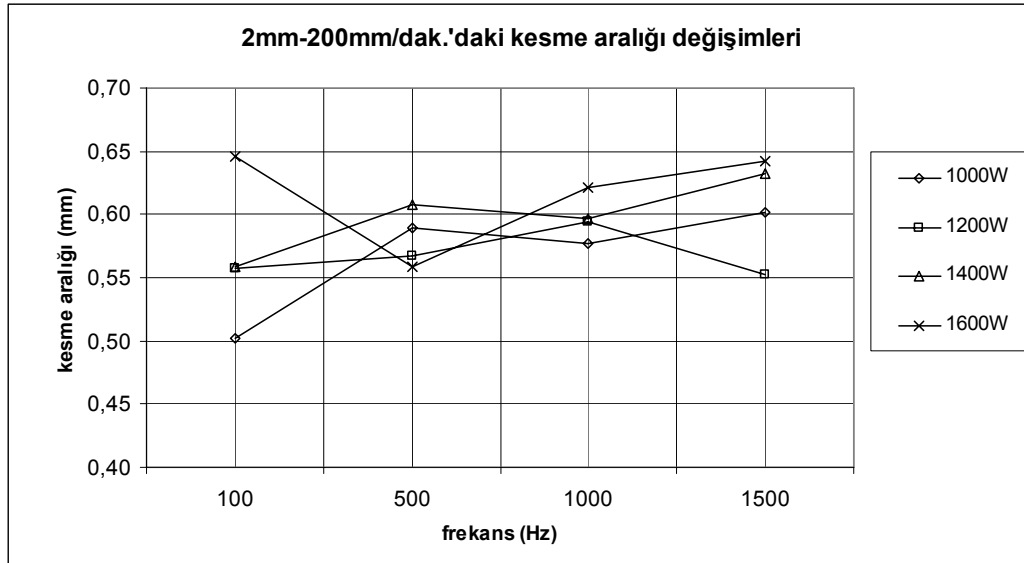
Lazer puls frekansının ve lazer gücünün sabit tutulduğu kesikler incelendiğinde; kesme hızının artmasının, kesme aralığının azalmasına sebep olduğu görülmüştür. 1000 Hz ve 1500 Hz’te bu durum daha belirgindir ve bu frekanslardaki kesme aralıkları daha düşüktür. Bu sonuç, 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekanslarındaki kesimlerin, daha düzgün olduğunu göstermektedir. K. A. Ghany ve M. Newishy de [7] 1.2 mm östenitik paslanmaz çelik ile yaptıkları çalışmalarında, artan kesme hızının kesme aralığında azalmaya sebep olduğunu göstermişlerdir. N. Rajaram ve arkadaşlarının [4] CO<sub>2</sub> lazer ile yaptıkları çalışmalarında da benzer sonuçlar görülmektedir. B. S. Yılbaş [6] ve A. Lamikiz [27] ile arkadaşları da benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Yapılan incelemelerde, uygulanan gücün artması ile kesme aralığında bir artış gözlenmektedir. Bu sonuçlar A. K. Dubey’in [28], B. S. Yılbaş’ın [6] ve K. A. Ghany’in [7] çalışmalarıyla örtüşmektedir.

### 7.3.2. Kesme aralığının lazer puls frekansı ve güce bağlı değişimi

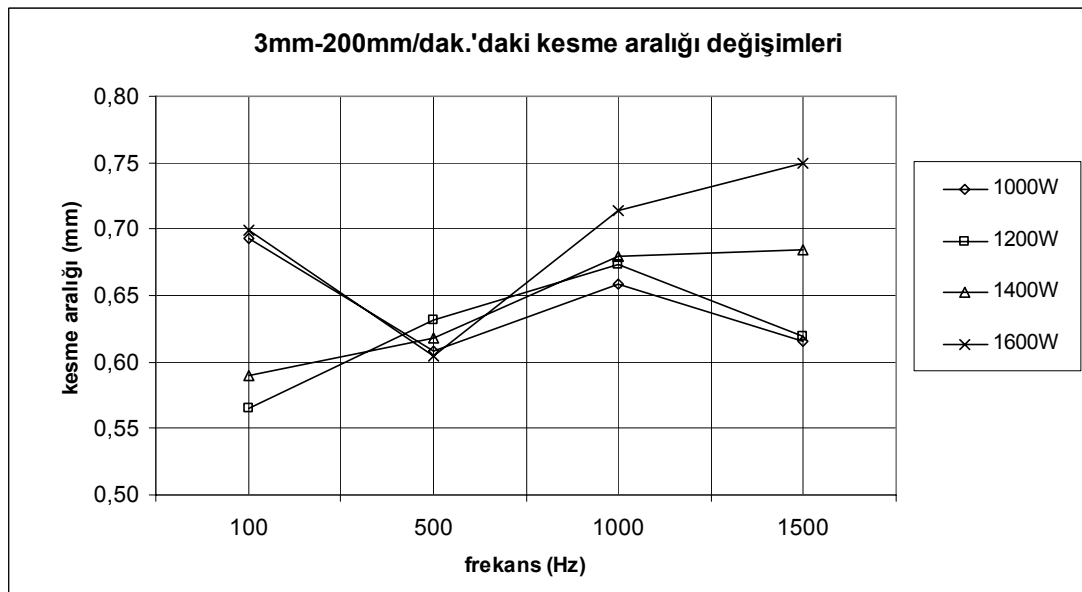
Lazer puls frekansının kesme aralığına etkisini incelemek amacıyla, kalınlık ve kesme hızı sabit tutulmuştur. Şekil 7.18 - Şekil 7.33’de lazer puls frekansı - kesme aralığı grafikleri görülmektedir.



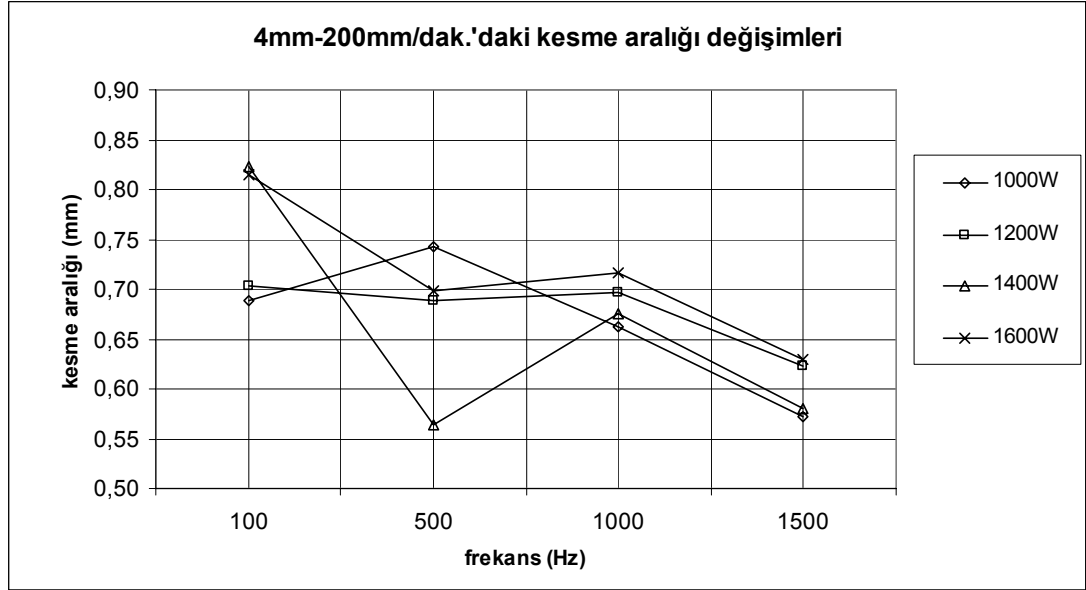
Şekil 7.18. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi (1mm, 200mm/dak)



Şekil 7.19. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(2mm, 200mm/dak)



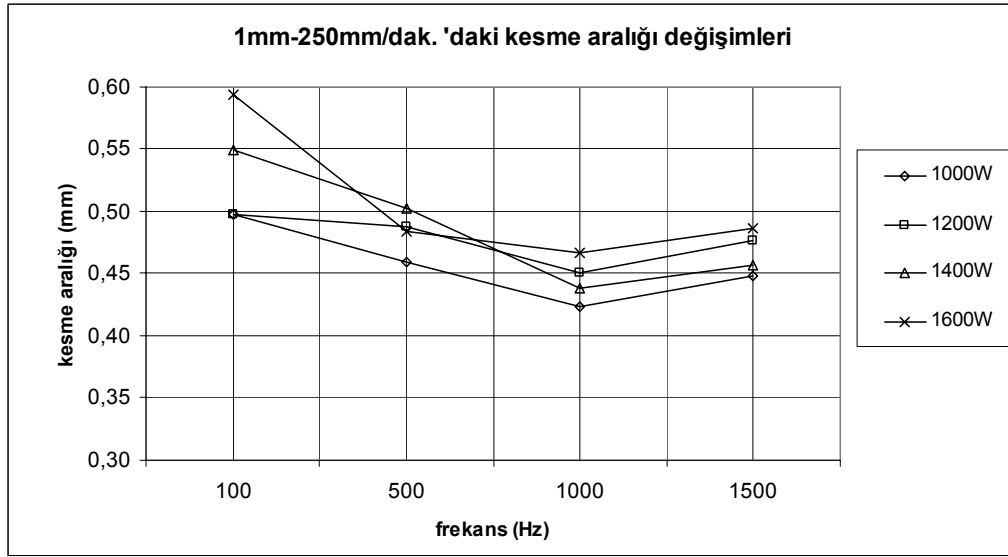
Şekil 7.20. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 200mm/dak)



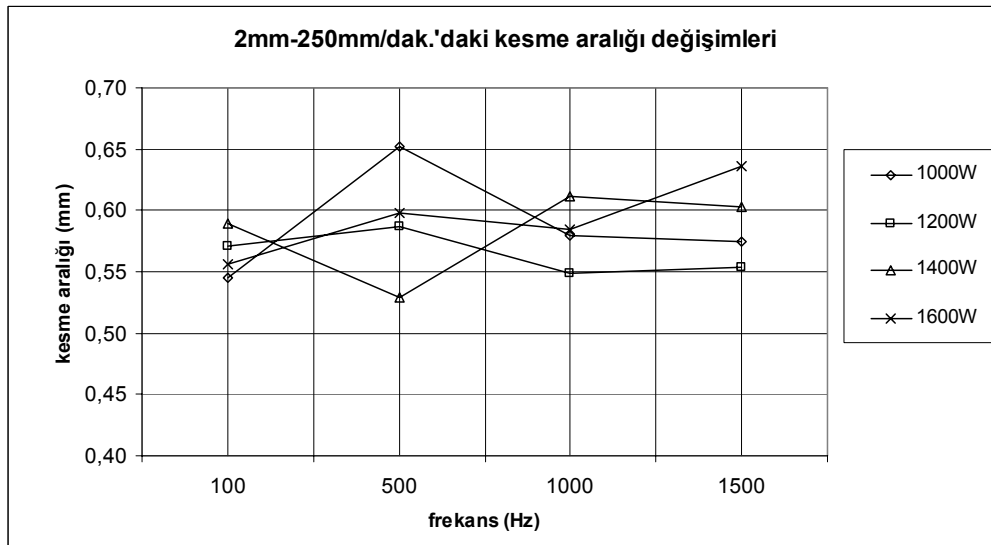
Şekil 7.21. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(4mm, 200mm/dak)

200 mm/dak kesme hızının sabit tutulduğu kesikler incelendiğinde 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekanslarında daha dar kesme aralıkları görülmektedir. Ancak yapılan incelemelerden lazer puls frekansının artmasının kesme aralığını azalttığı gibi bir sonuç çıkarılamamaktadır.

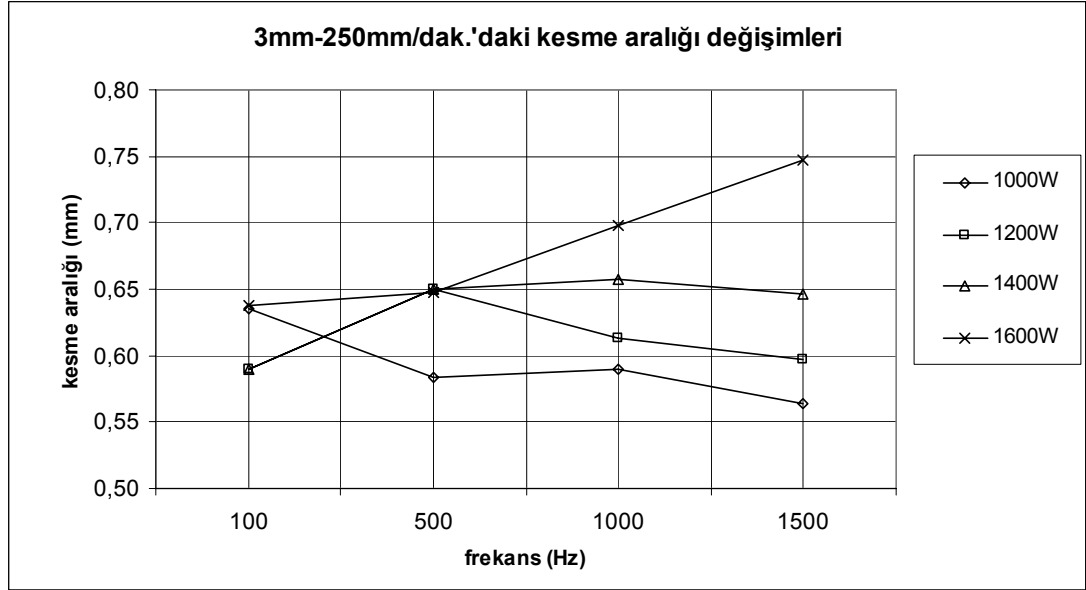
250 mm/dak, 300 mm/dak ve 350 mm/dak kesme hızının sabit tutulduğu kesikler de incelenmiştir. Kesme aralığı incelenen bu parametrelerdeki kesiklerinden elde edilen sonuçlar Şekil 7.22 - Şekil 7.33 'de kesme aralığı – lazer puls frekansı grafikleri olarak verilmiştir.



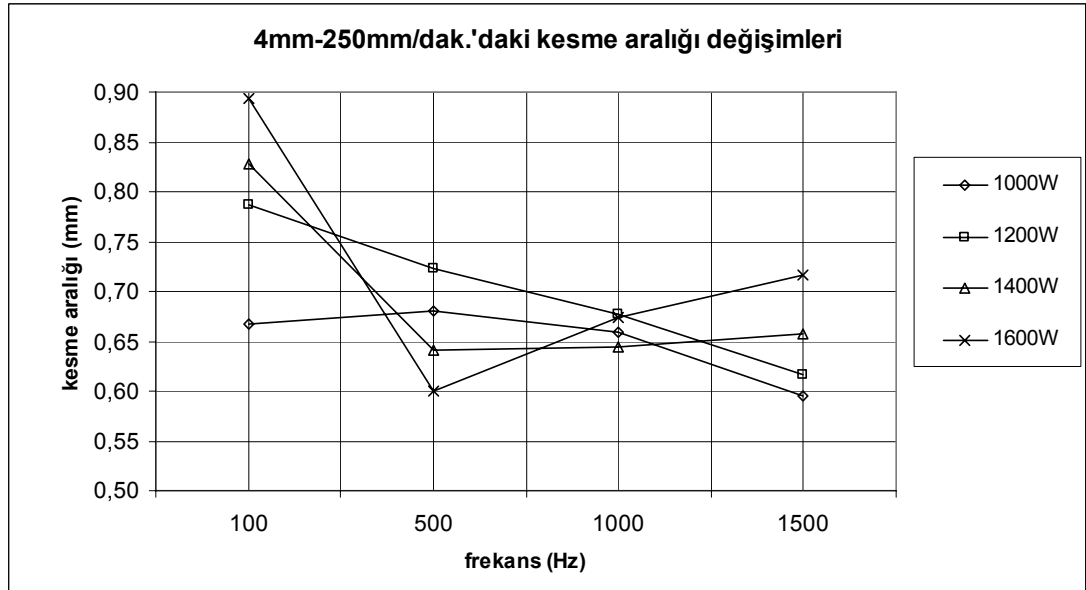
Şekil 7.22. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(1mm, 250mm/dak)



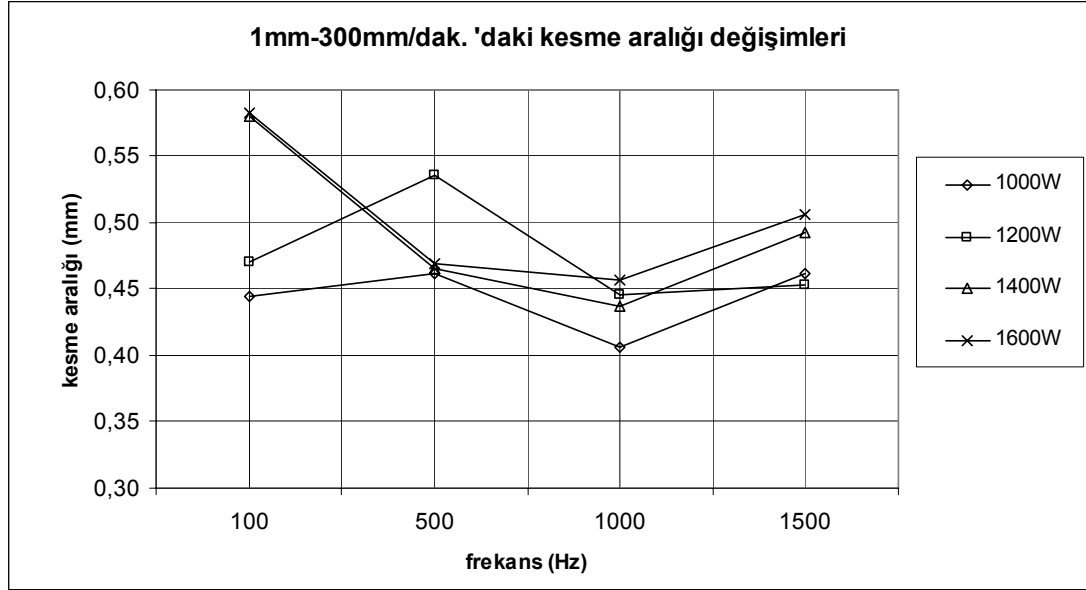
Şekil 7.23. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(2mm, 250mm/dak)



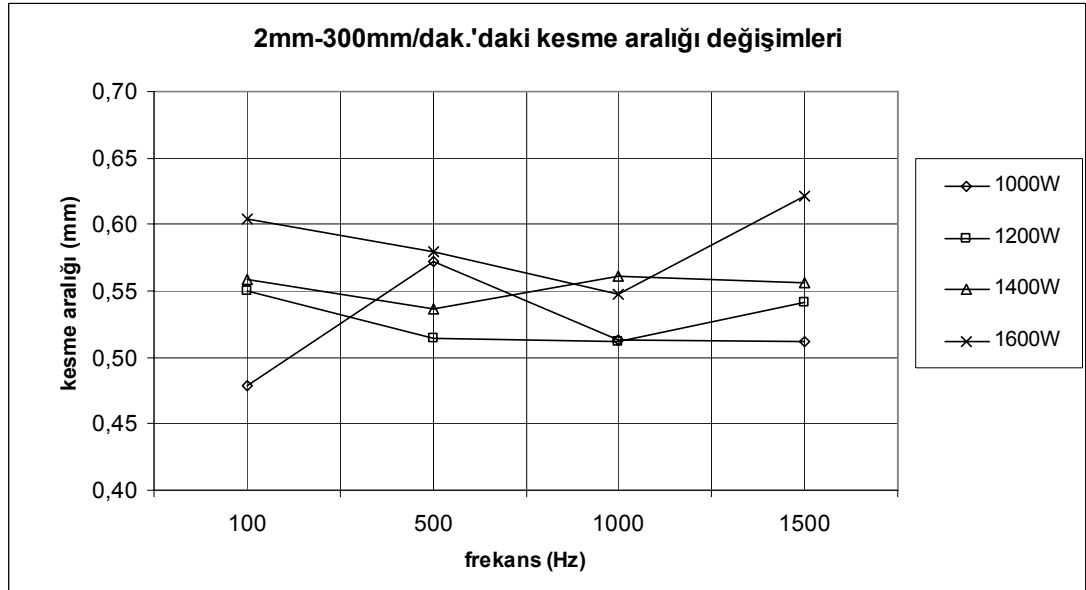
Şekil 7.24. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 250mm/dak)



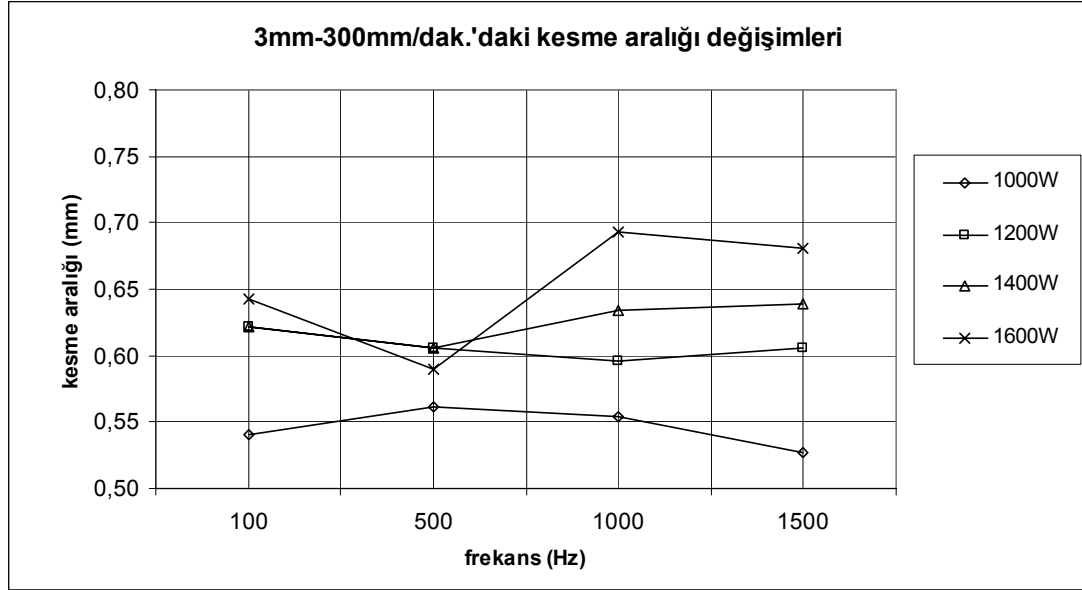
Şekil 7.25. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(4mm, 250mm/dak)



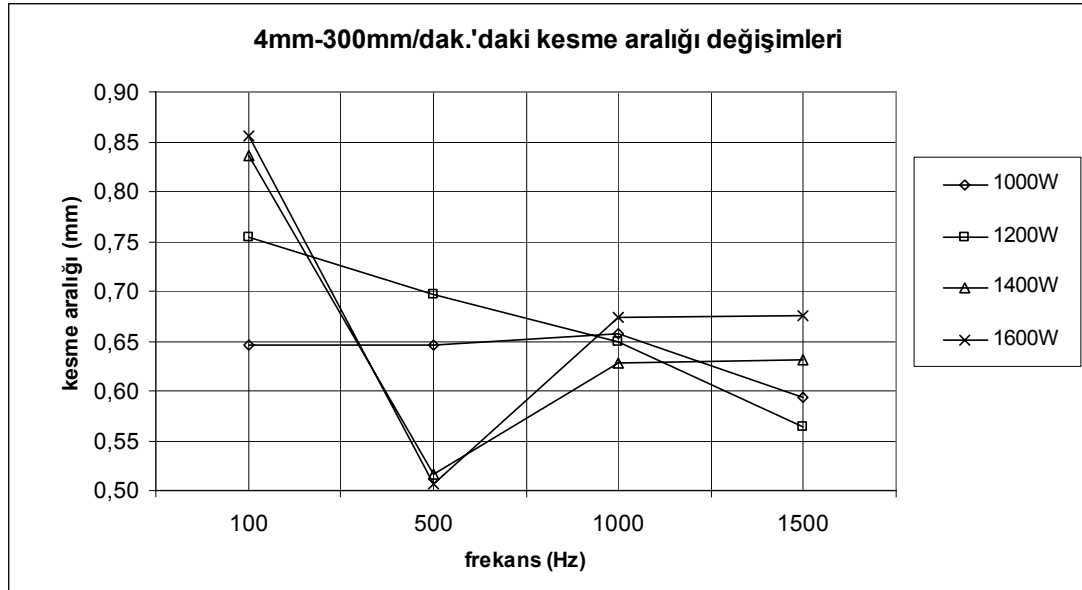
Şekil 7.26. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(1mm, 300mm/dak)



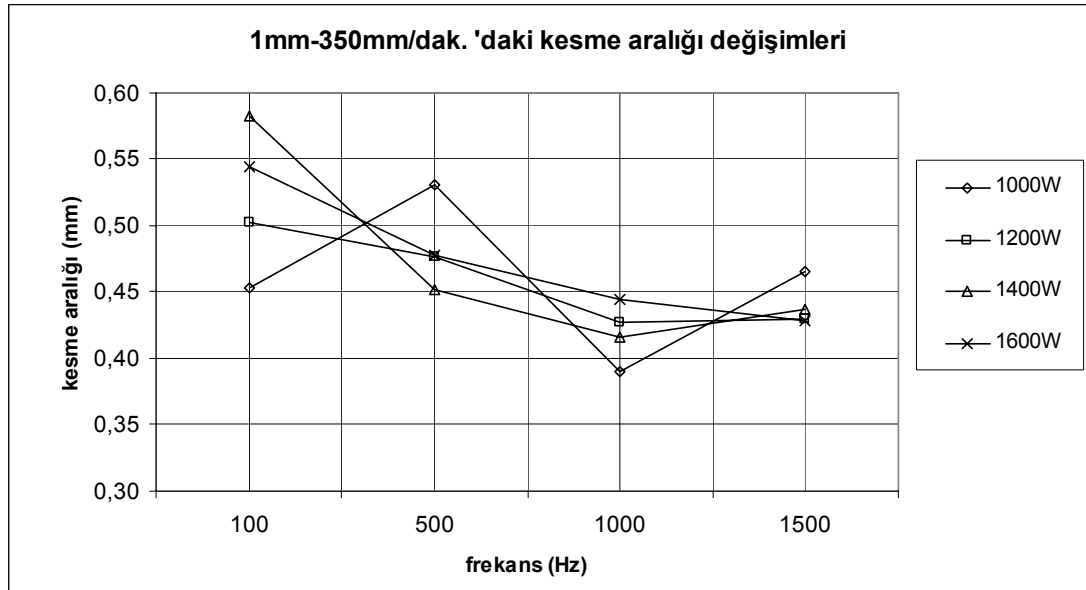
Şekil 7.27. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişim  
(2mm, 300mm/dak)



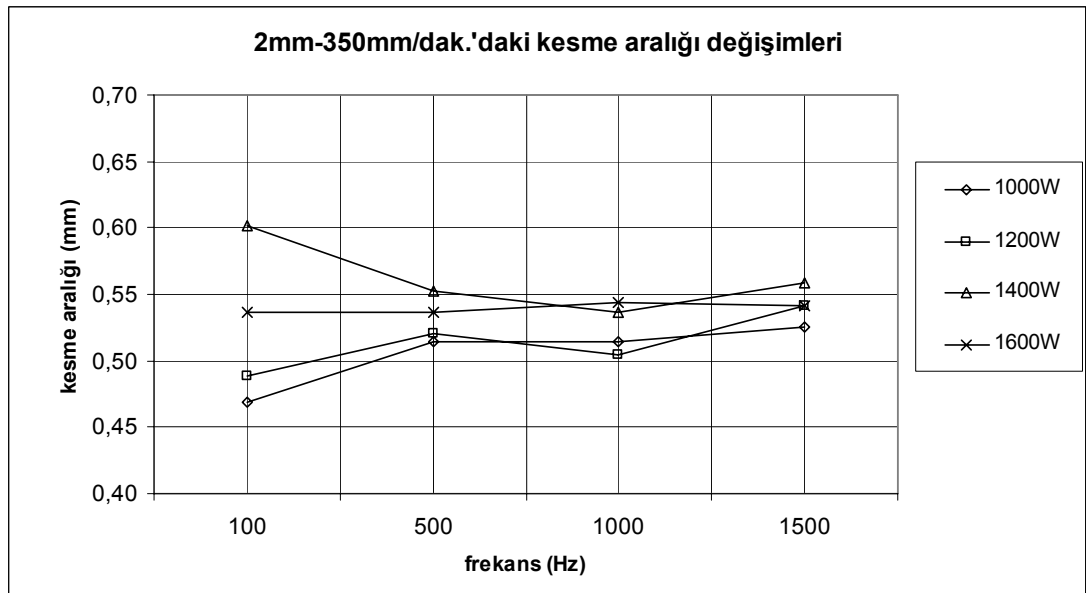
Şekil 7.28. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 300mm/dak)



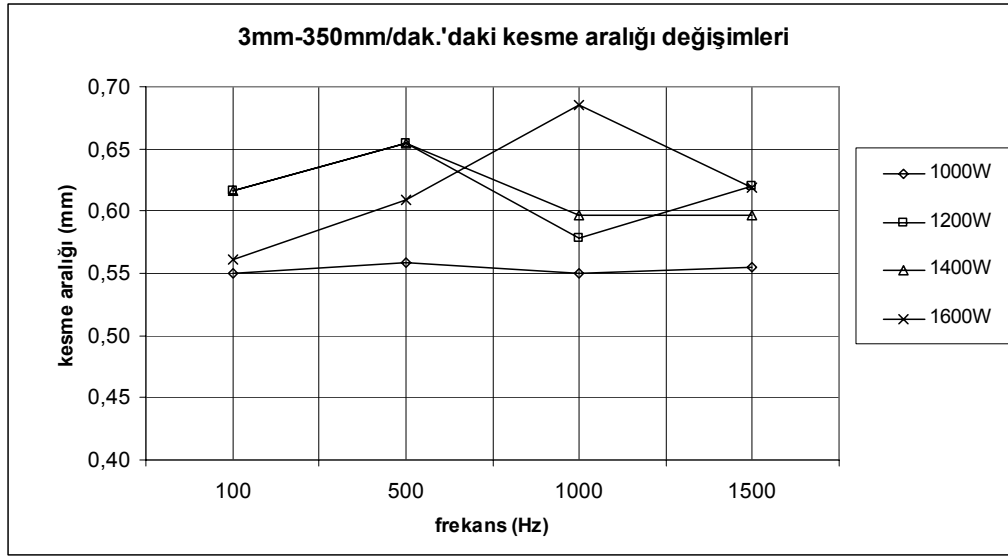
Şekil 7.29. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(4mm, 300mm/dak)



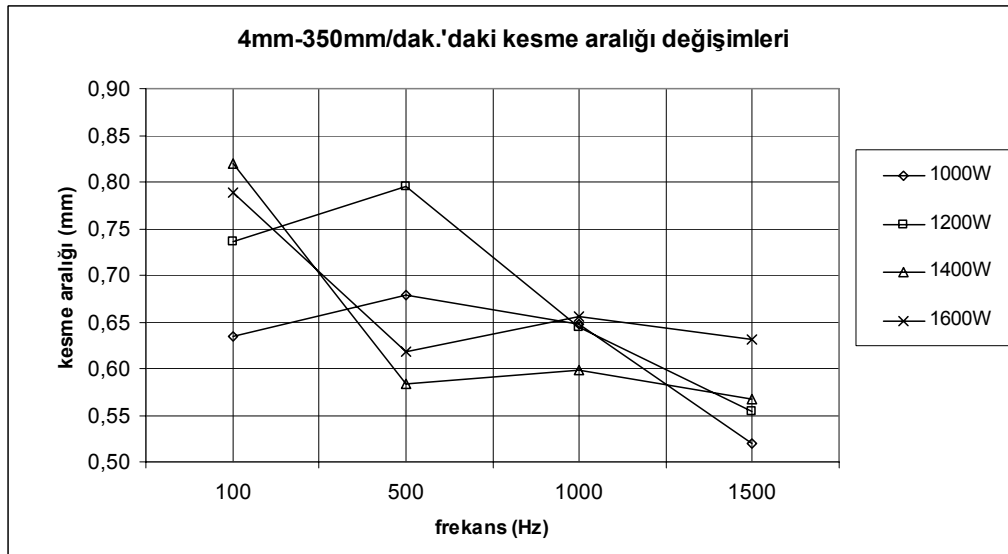
Şekil 7.30. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(1mm, 350mm/dak)



Şekil 7.31. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(2mm, 350mm/dak)



Şekil 7.32. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(3mm, 350mm/dak)

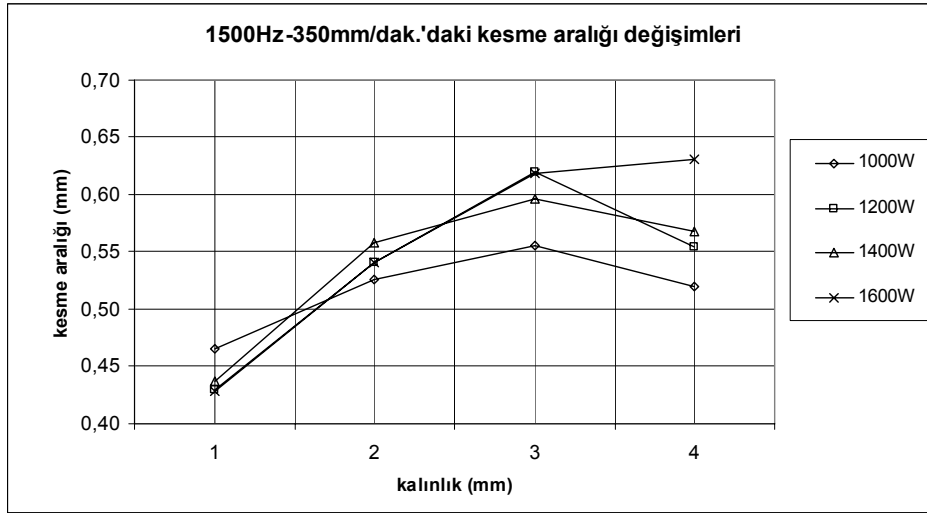


Şekil 7.33. Kesme aralığının frekans ve güce bağlı değişimi  
(4mm, 350mm/dak)

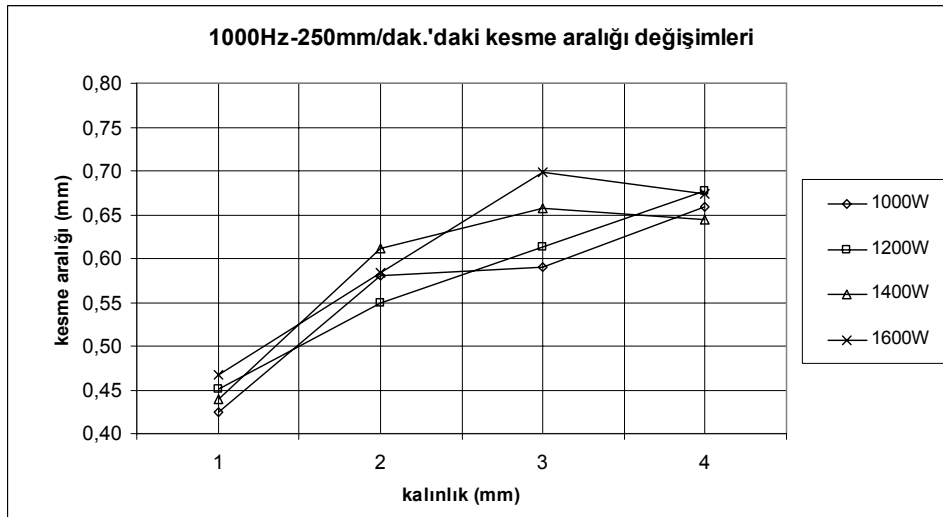
İncelemelerde, lazer puls frekansının artması ile kesme aralığının genel olarak düştüğü görülmüştür. 100 Hz'de kesme aralığında keskin artışlar söz konusudur. Bu sebep ile 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekanslarının bu nitelikteki kesme için daha uygun olduğu söylenebilir.

### 7.3.3. Kesme aralığının malzeme kalınlığı ve güce bağlı değişimi

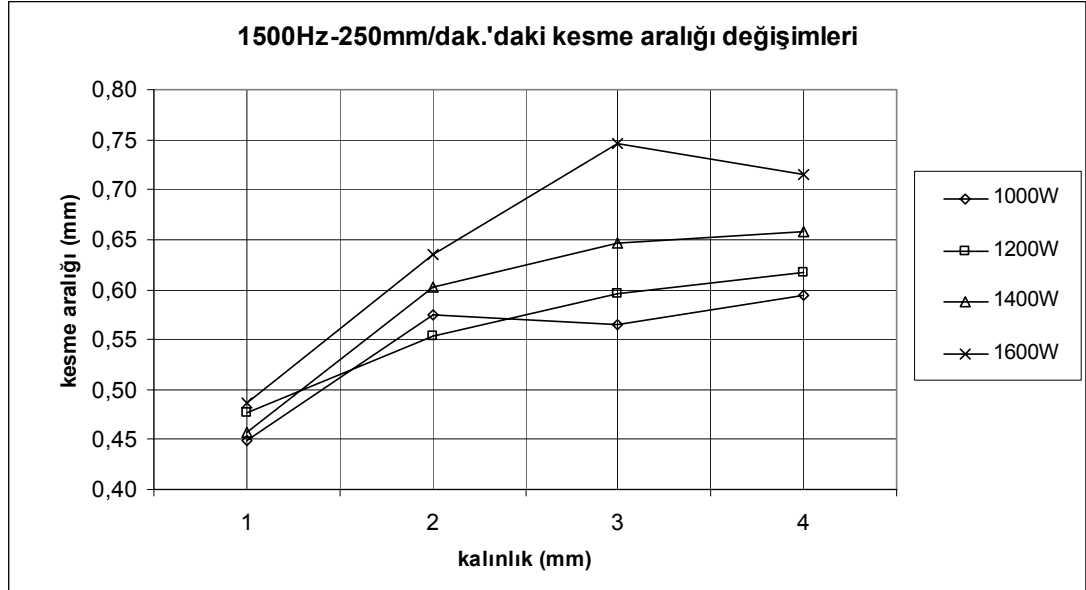
Malzeme kalınlığının kesme aralığına etkisini incelemek amacıyla lazer puls frekansı ve kesme hızının sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.34-Şekil 7.37'deki grafiklerle gösterilmiştir.



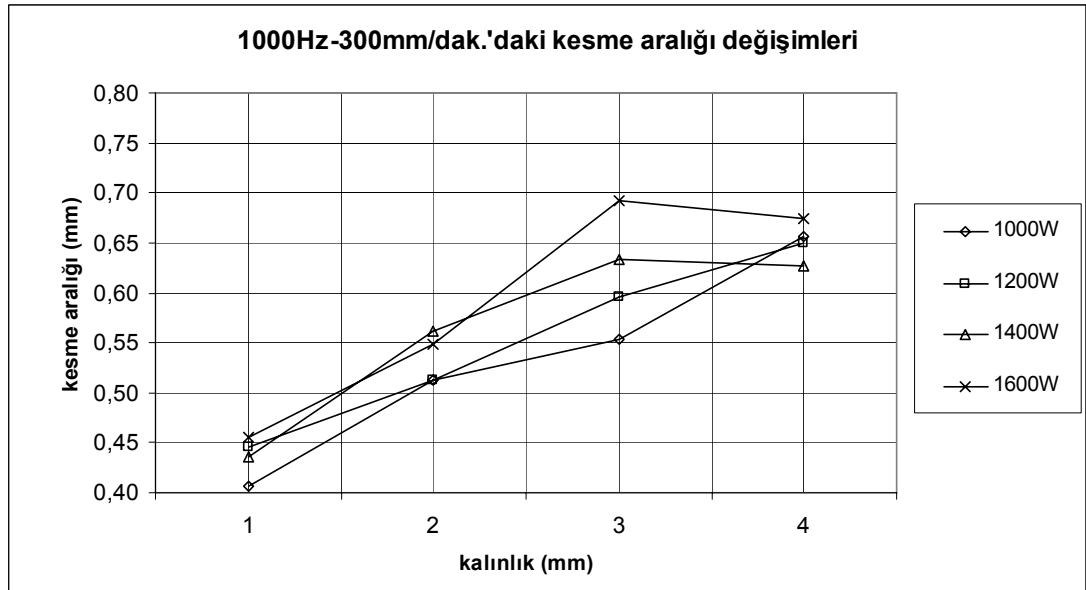
Şekil 7.34. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi  
(1500 Hz, 350mm/dak)



Şekil 7.35. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi  
(1000 Hz, 250mm/dak)



Şekil 7.36. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi  
(1500 Hz, 250mm/dak)



Şekil 7.37. Kesme aralığının kalınlık ve güce bağlı değişimi  
(1000 Hz, 300mm/dak)

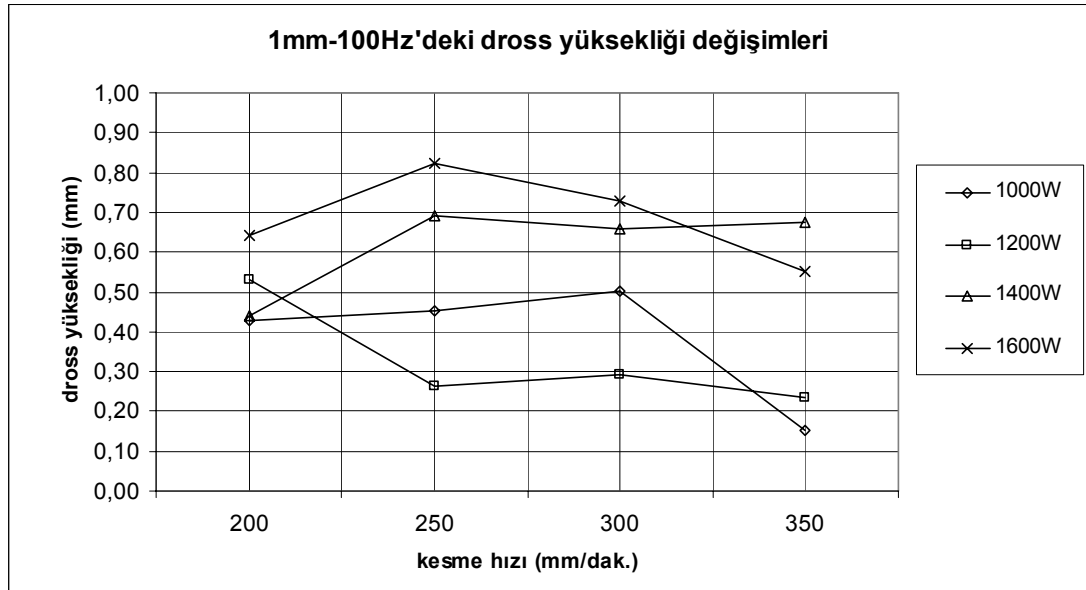
Kalınlık artışını incelediğimiz parçalarda, kalınlık artışı ile kesme aralığı artmıştır. Bu sonuçlar B. S. Yılbaş'ın [3] çalışması ile uyumludur.

#### 7.4. Dross Yüksekliğinin Parametrelere Bağlı Değişimi

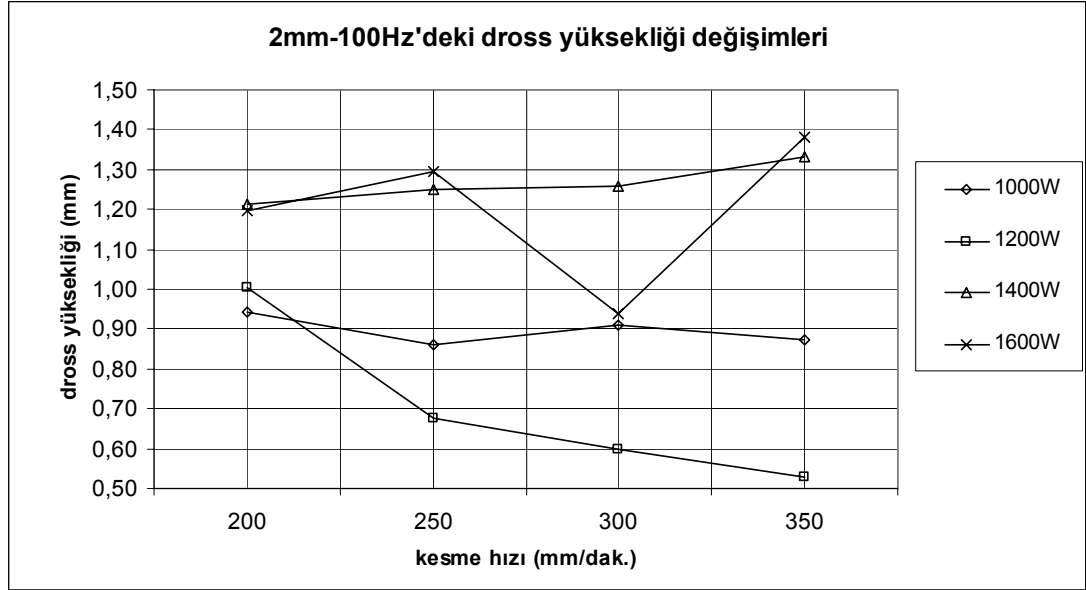
İlk olarak lazer puls frekansı ve kalınlık sabit tutularak dross yüksekliğinin lazer gücü ve kesme hızına bağlı değişimleri incelenmiştir. Daha sonra frekansa bağlı değişimler incelenmiş, inceleme sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. Sonrasında malzeme kalınlığının dross oluşumuna etkisi incelenmiştir.

##### 7.4.1. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi

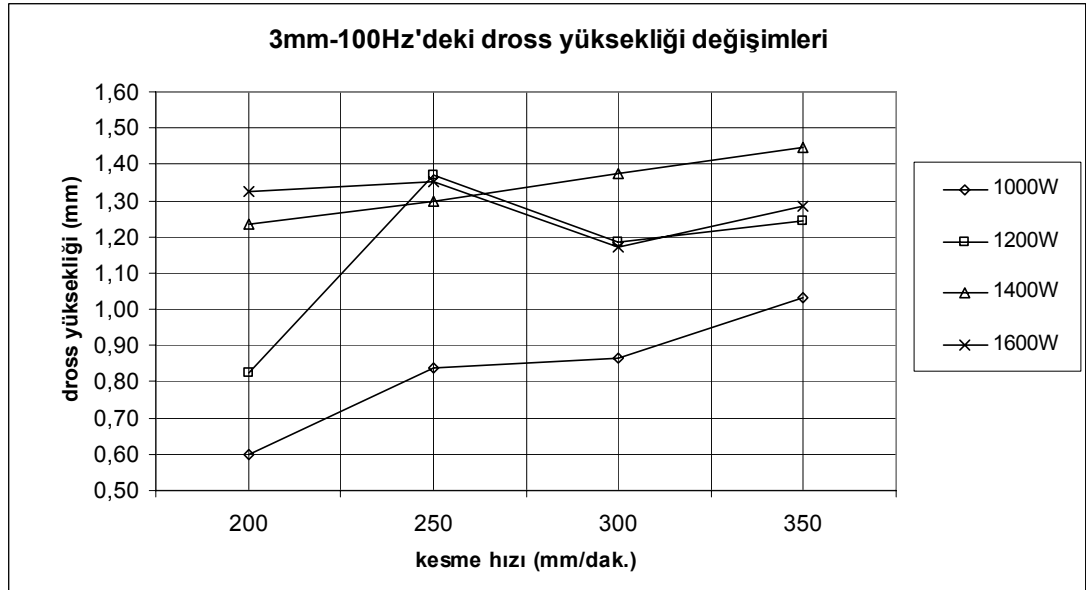
100 Hz lazer puls frekansı sabit tutularak kesme hızı ile dross yüksekliği değişimi incelenmiş, sonuçlar Şekil 7.38 - Şekil 7.41'de verilmiştir. Daha sonra aynı çalışma 500 Hz, 1000 Hz ve 1500 Hz için yapılmıştır.



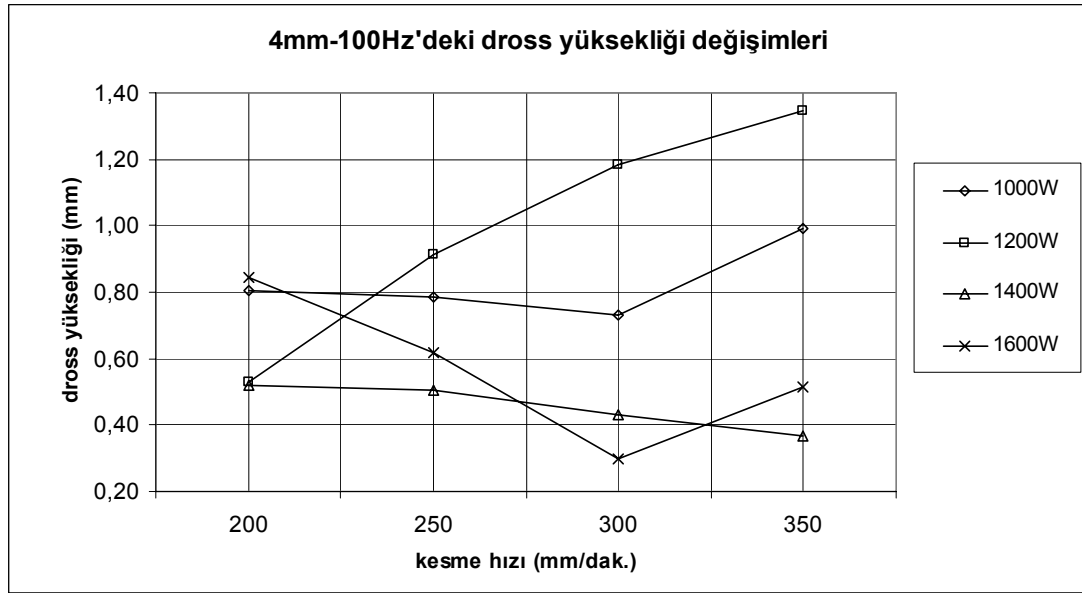
Şekil 7.38. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 100Hz)



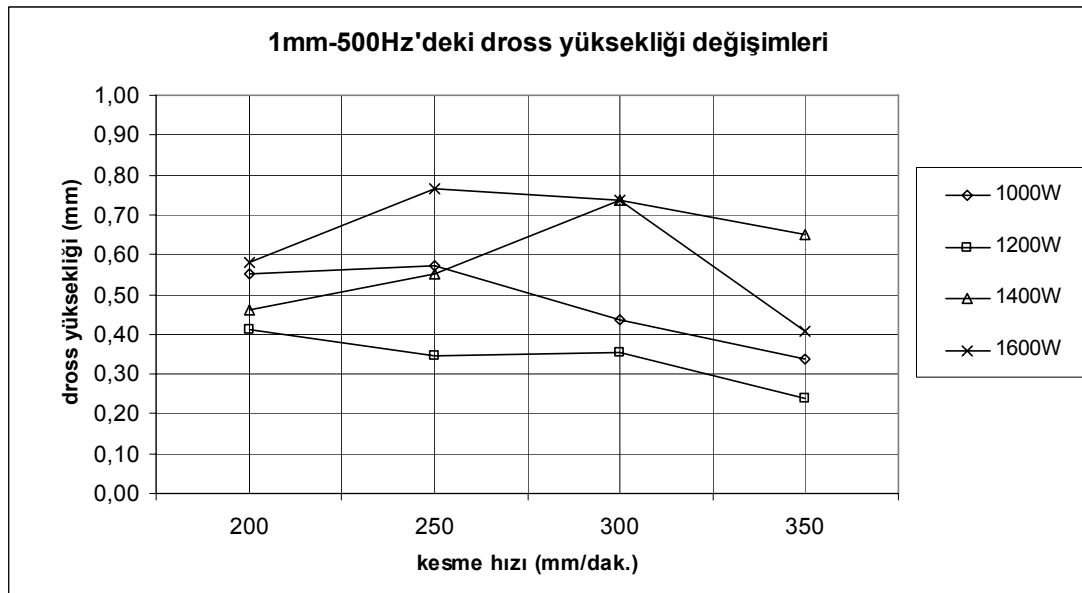
Şekil 7.39. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (2mm, 100Hz)



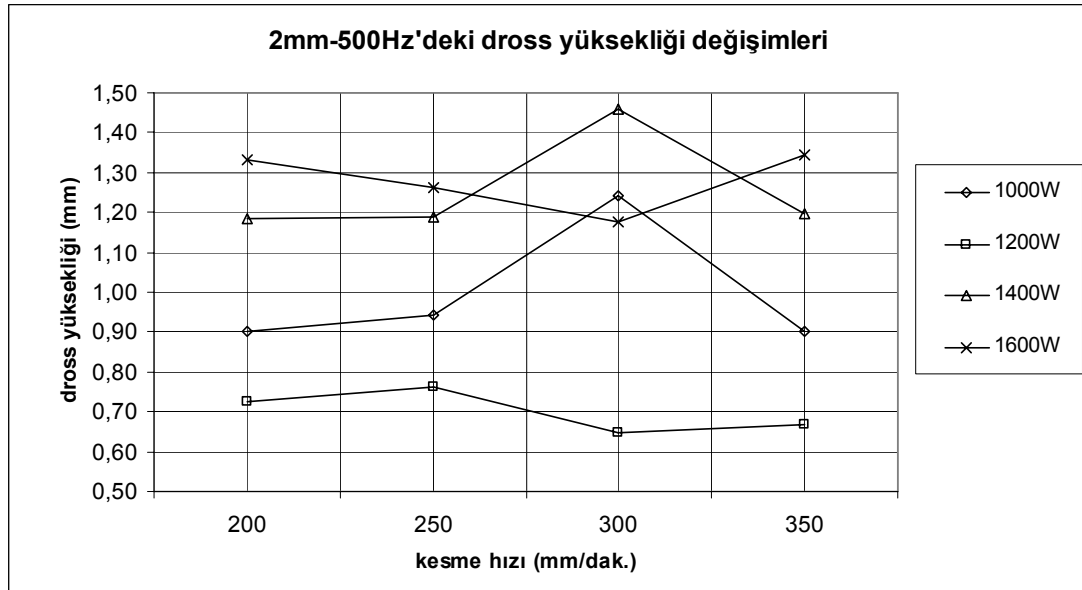
Şekil 7.40. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (3mm, 100Hz)



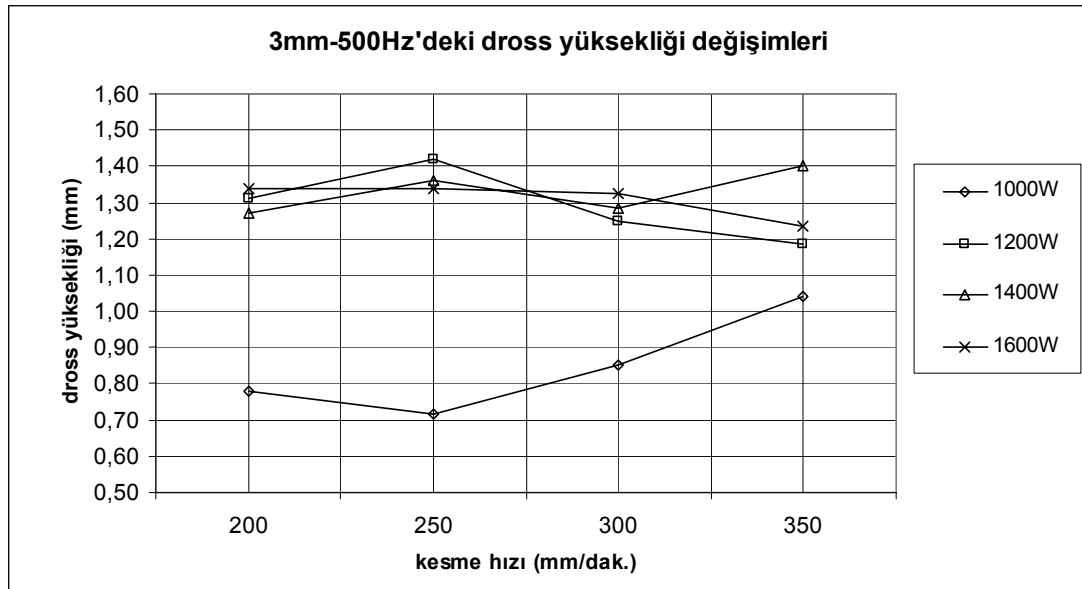
Şekil 7.41. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (4mm, 100Hz)



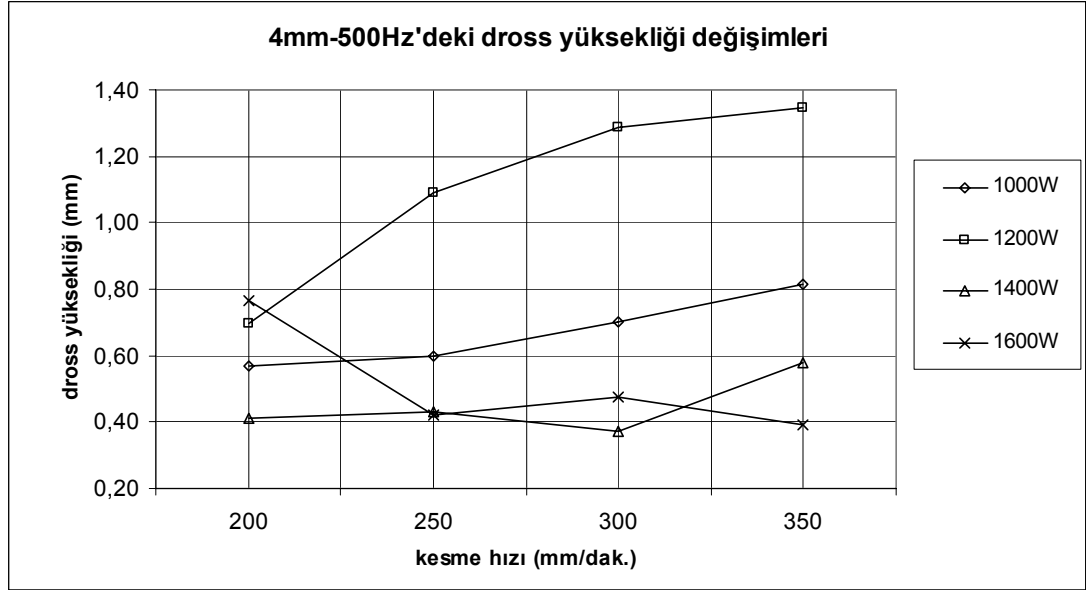
Şekil 7.42. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (1mm, 500Hz)



Şekil 7.43. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (2mm, 500Hz)



Şekil 7.44. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (3mm, 500Hz)

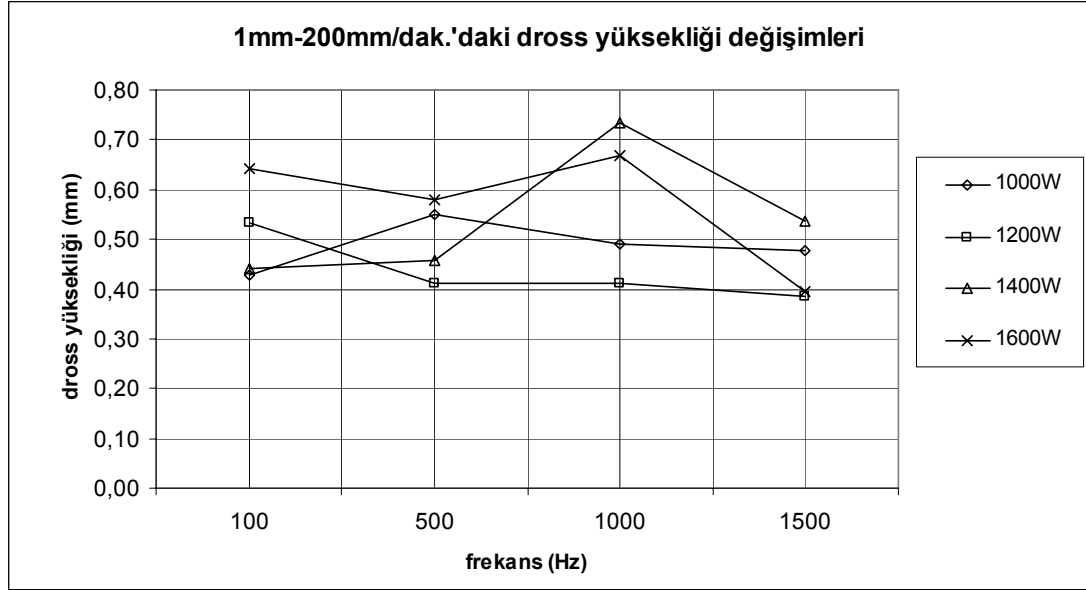


Şekil 7.45. Dross yüksekliğinin kesme hızı ve güce bağlı değişimi (4mm, 500Hz)

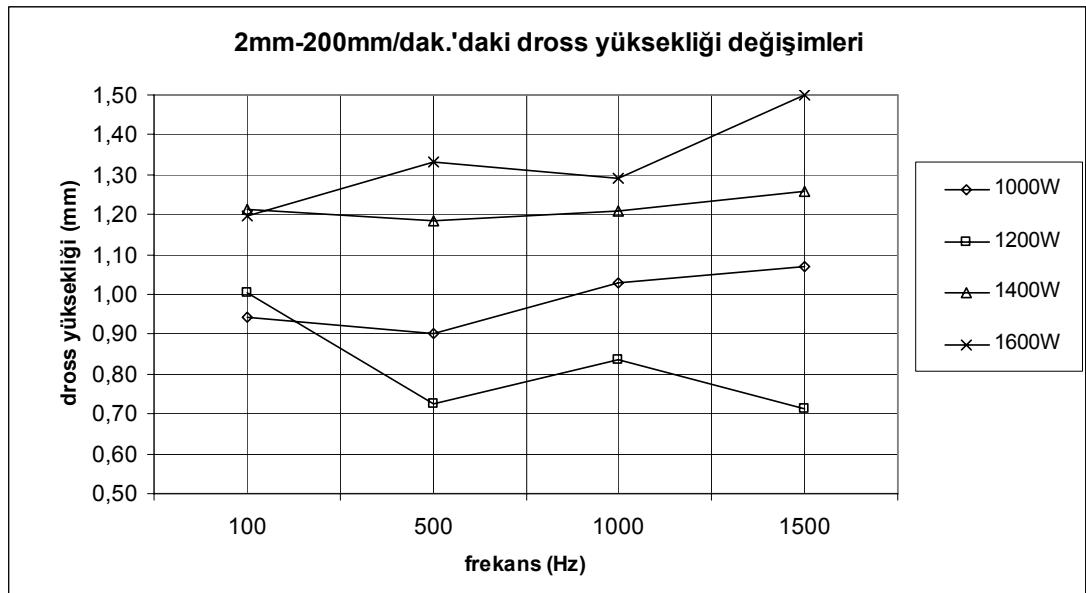
Sonuçlara baktığımızda 1000 W'ın sabit tutulduğu kesiklerde kesme hızının artışı dross yüksekliğini artırmıştır. Diğer lazer gücü değerlerinde kesme hızı değişimi dross yüksekliğini belirgin olarak etkilememiştir.

#### 7.4.2. Dross yüksekliğinin lazer puls frekansı ve güce bağlı değişimi

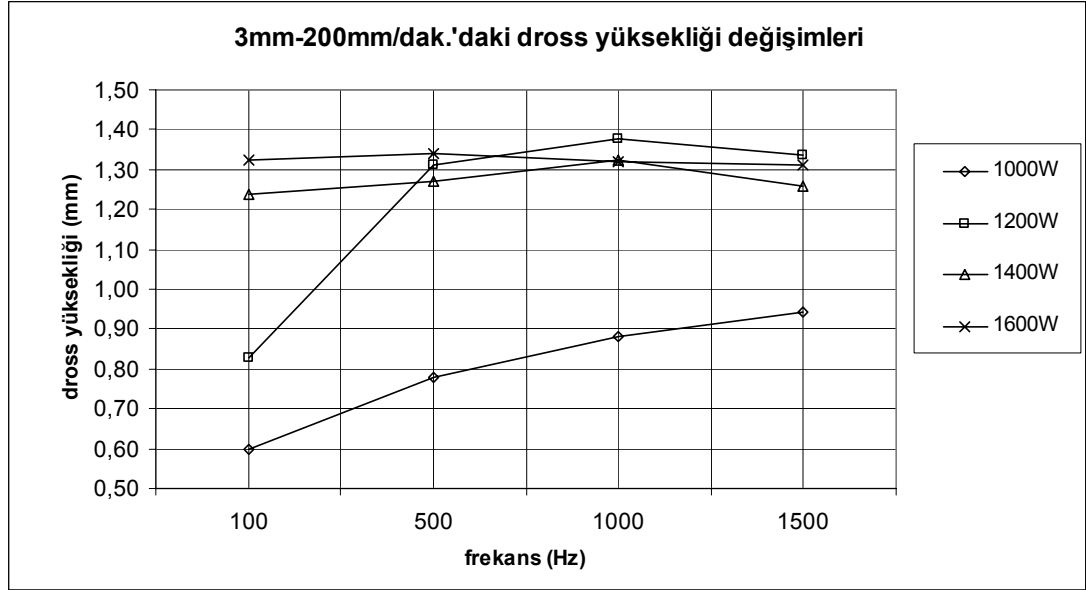
Dross yüksekliğinin lazer puls frekansı ve lazer gücü ile ilişkisini incelemek için malzeme kalınlığı ve kesme hızının sabit tutulduğu kesikler incelenmiş, lazer puls frekansı - dross yüksekliği grafikleri (Şekil 7.46 - Şekil 7.49) oluşturulmuştur. 1 mm malzeme kalınlığı ve 200 mm/dak kesme hızı sabit tutularak dört farklı lazer gücü için dross yüksekliği değişimleri incelenmiştir. Daha sonra 2 mm, 3 mm ve 4 mm malzeme kalınlığı için aynı parametrelerde incelemeler yapılmıştır.



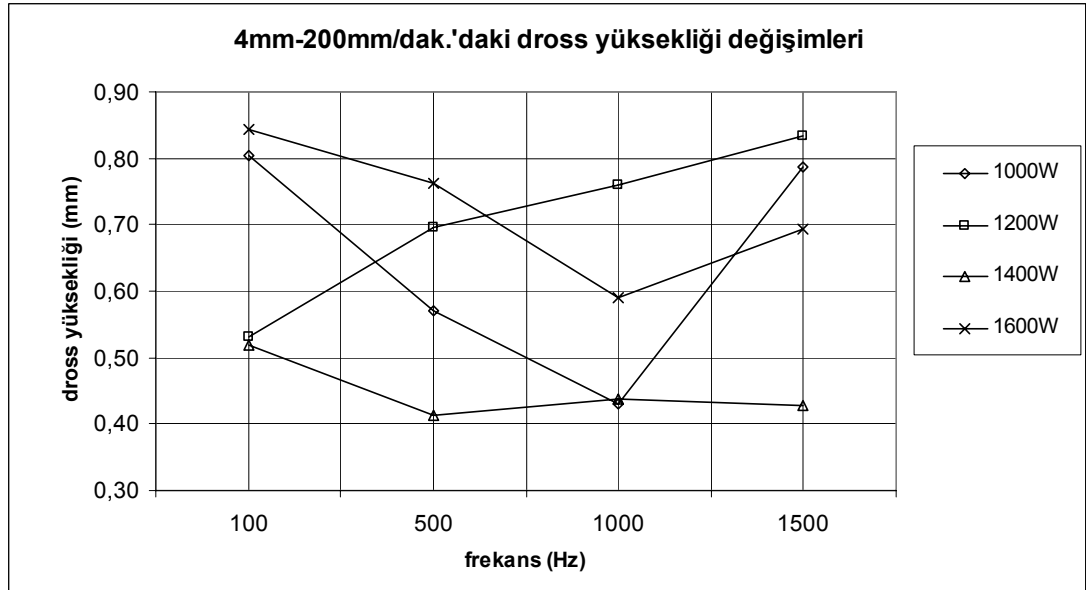
Şekil 7.46. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi (1mm, 200mm/dak)



Şekil 7.47. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi (2mm, 200mm/dak)



Şekil 7.48. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi (3mm, 200mm/dak)

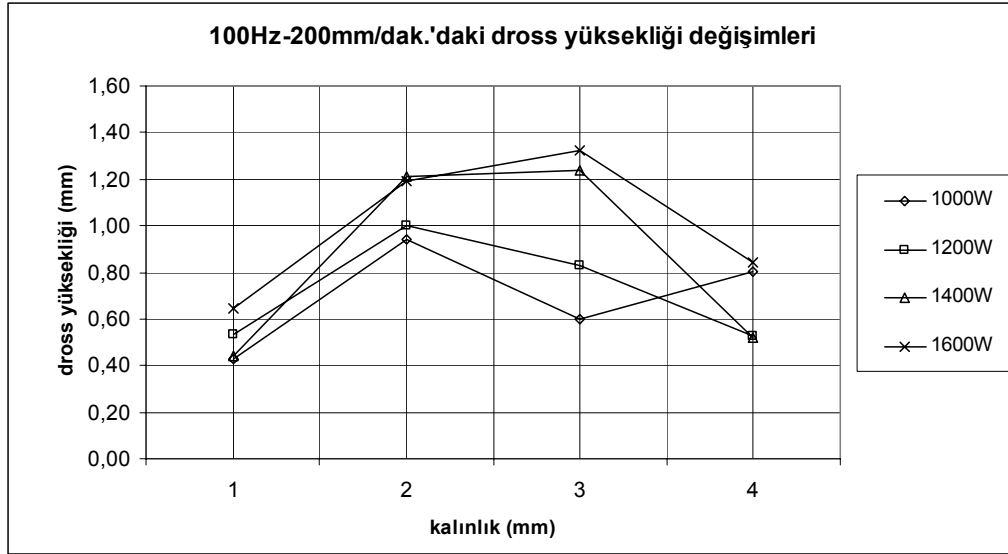


Şekil 7.49. Dross yüksekliğinin frekans ve güce bağlı değişimi (4mm, 200mm/dak)

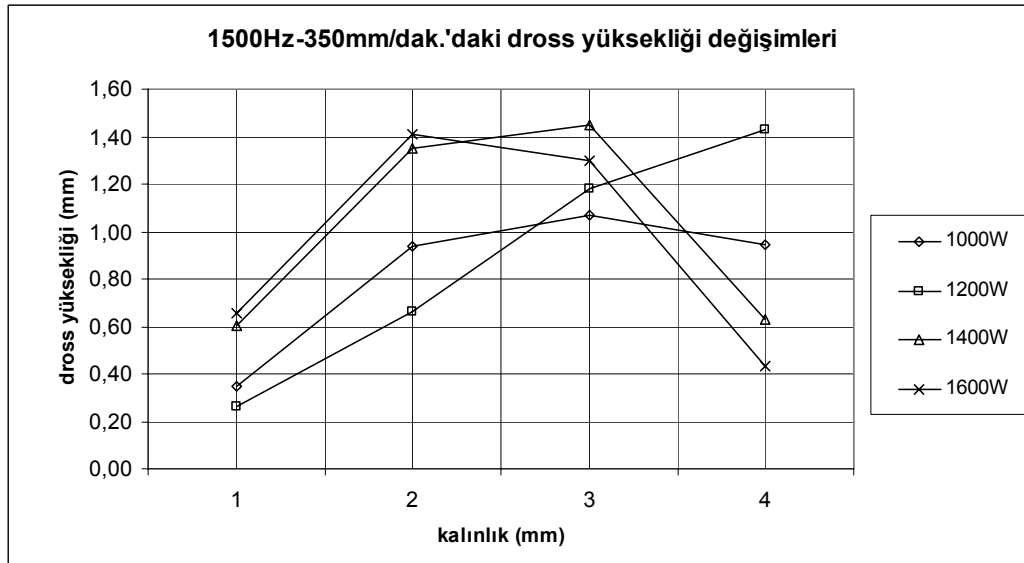
Yapılan incelemelerde lazer puls frekansının dross yüksekliği ile bir ilişkisi görülmemektedir.

### 7.4.3. Dross yüksekliğinin malzeme kalınlığı ve güce bağlı değişimi

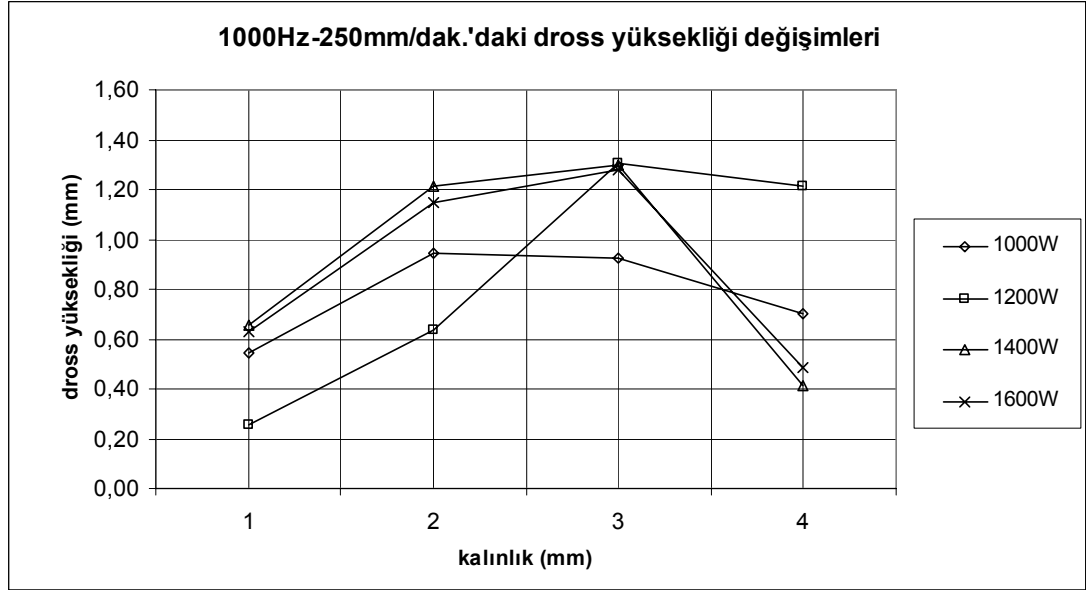
Malzeme kalınlığı ve lazer gücünün dross yüksekliğine etkisini incelemek için lazer puls frekansı ve kesme hızını sabit tutulmuştur.



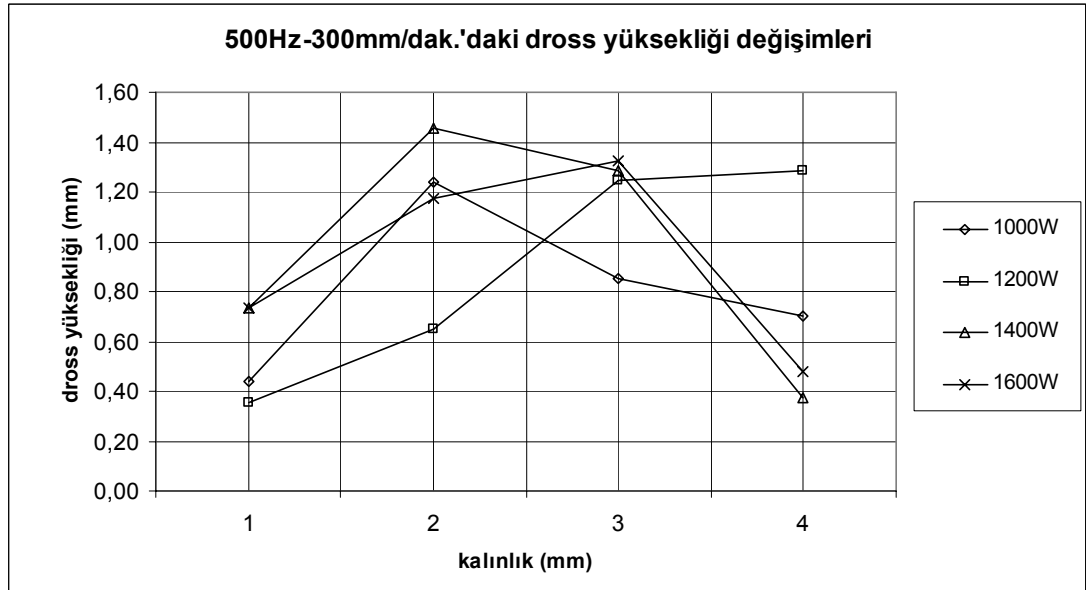
Şekil 7.50. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi (100Hz, 200mm/dak)



Şekil 7.51. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi (1500Hz, 350mm/dak)



Şekil 7.52. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi (1000Hz, 250mm/dak)



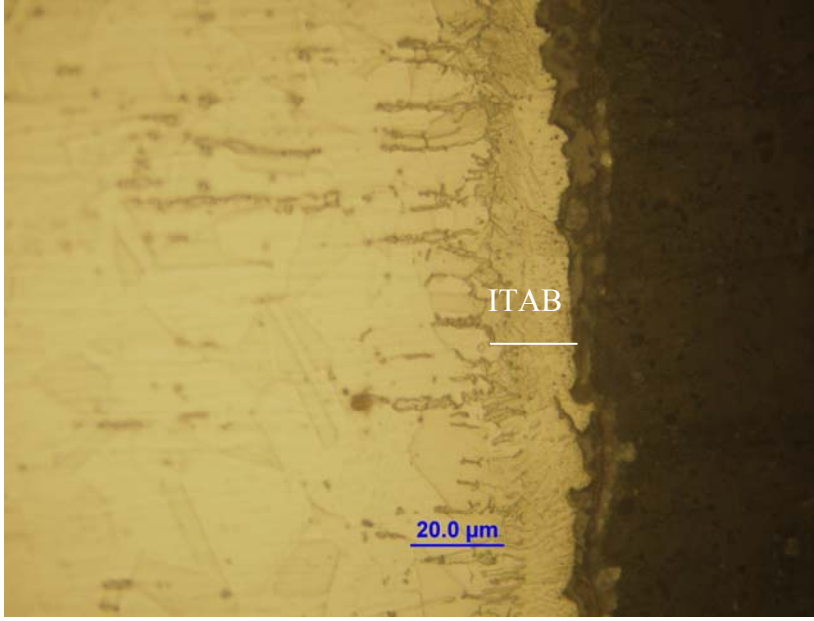
Şekil 7.53. Dross yüksekliğinin kalınlık ve güce bağlı değişimi (500Hz, 300mm/dak)

Dross yüksekliği ile ilgili ölçümlerdeki zorluklar nedeniyle, üç farklı metot kullanılmış; ölçümlerde bazı drossların, kesiklerin diğer tarafa yapışmış olması ölçüm sonuçlarımızı etkilemiştir. Yapılan ölçümler incelendiğinde, gücün artması ile dross yüksekliğinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir.

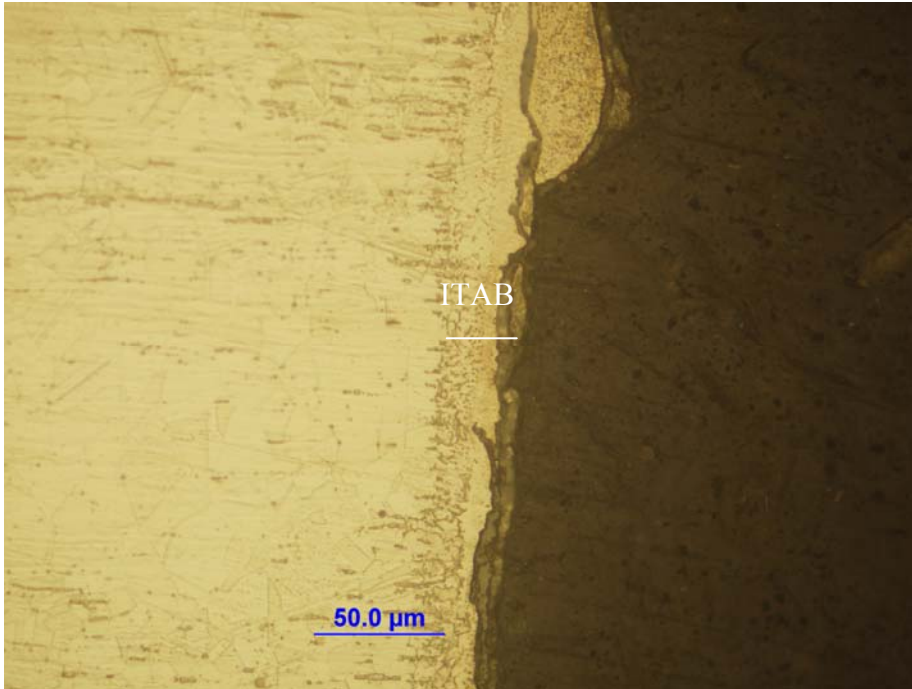
Kesme hızının artışı ile dross yüksekliğinin hem arttığı hem de azaldığı durumlar görüldüğü için kesme hızı dross yüksekliği ilişkisi belirlenememiştir. Kalınlık ile ilişkisine baktığımızda 1mm'den 2mm'ye geçişte dross yüksekliğinin arttığı, 2mm'den 3mm ve 4mm kalınlıklara geçildiğinde dross yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, 3mm ve 4mm kalınlıklarda kesiğin alt yüzeyine daha az enerji ulaştığı için meydana gelmiştir. Dross yüksekliği ölçümleri için malzemeyi kesimden sonra dış etkilere mümkün olduğunca korumak gerekmektedir. Kesik yüzeyine uygulanan dış etkiler yapışan drossun malzemeden kopmasına neden olmakta ve ölçüm sonuçlarını etkilemektedir.

#### **7.5. Lazer Kesiklerindeki ITAB'ın İncelenmesi**

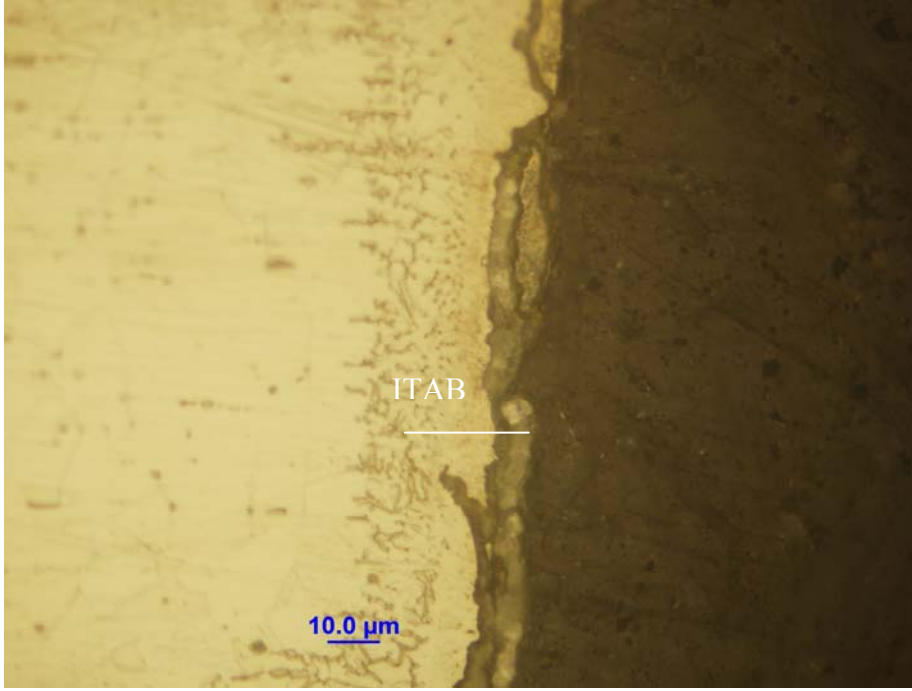
Belirlenen bazı parametreler için, ısıdan etkilenmiş bölgelerin tespiti için hazırlanan numuneler önce 600 meş, sonra 1000 meş zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra yüzeyin daha pürüzsüz hale gelmesi için 6  $\mu\text{m}$  ve daha sonra 3  $\mu\text{m}$  aşındırıcı ile son parlatma işlemi yapılmıştır. %40 HCl, %30  $\text{HNO}_3$  ve %40  $\text{H}_2\text{O}$ 'dan oluşan dağlayıcı ile 10 dakika bekletilen numunelerden optik mikroskop yardımıyla fotoğraflar elde edilmiştir ( Resim 7.9 - Resim 7.23).



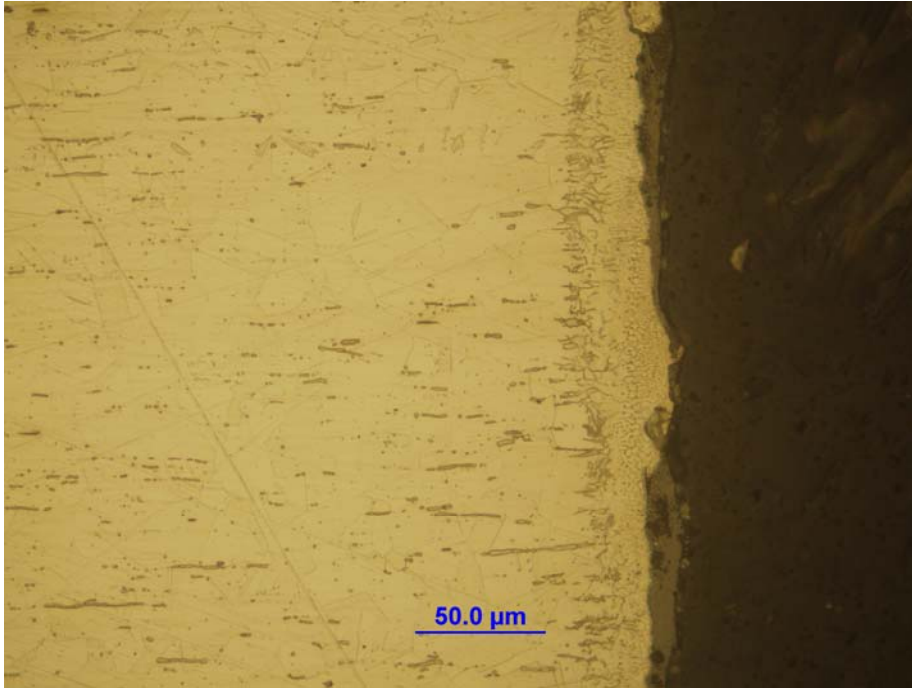
Resim 7.9. ITAB 1000x büyütme (3mm,1000W, 200mm/dak, 500Hz)



Resim 7.10. ITAB 500x büyütme (3mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz)



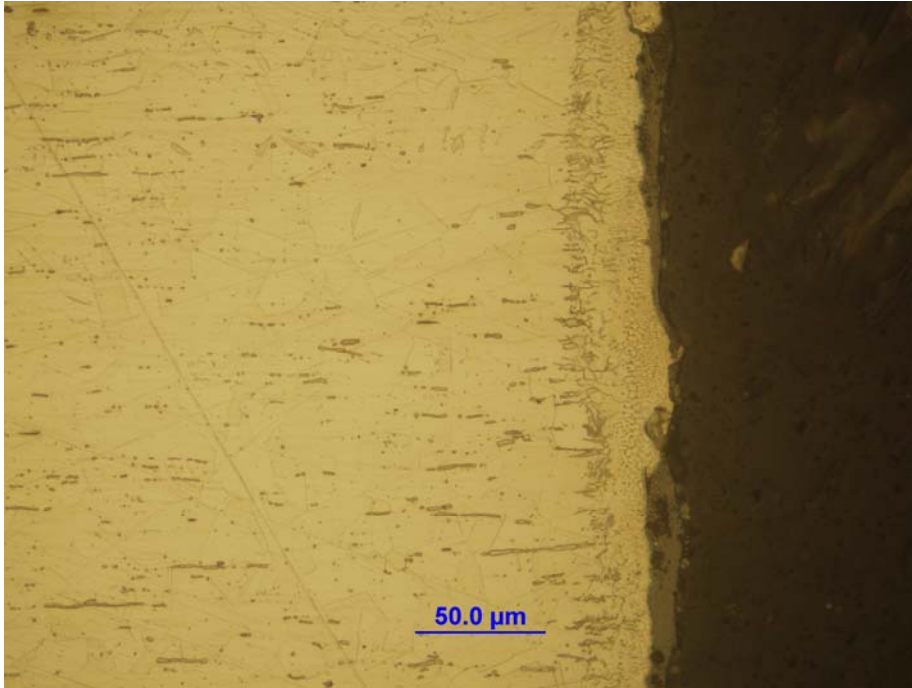
Resim 7.11. ITAB 1000x büyütmeye (3mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz)



Resim 7.12. ITAB 500x büyütmeye (3mm, 1000 W, 350mm/dak, 1500Hz)



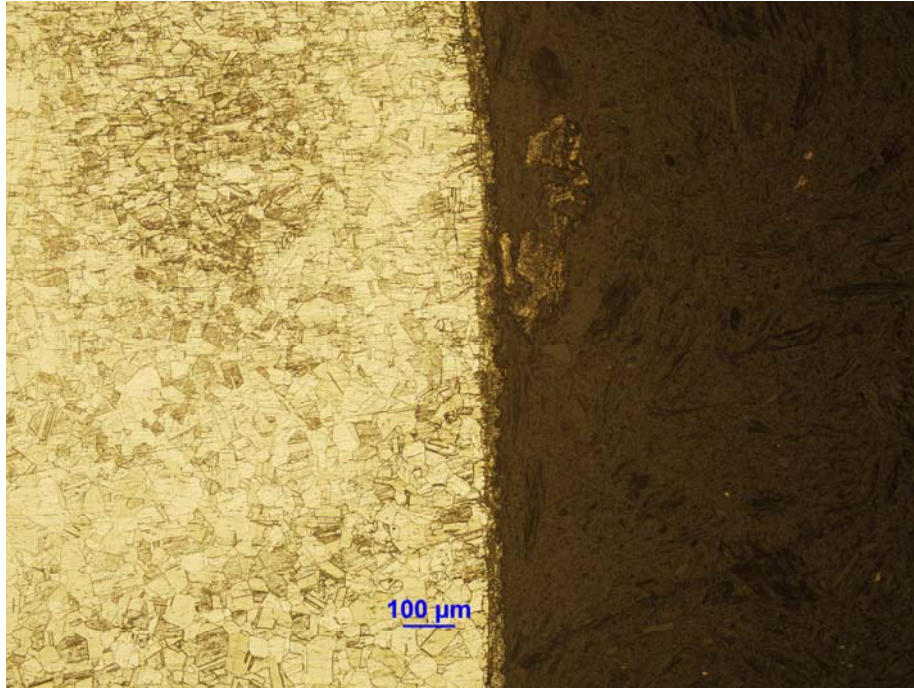
Resim 7.13. ITAB 1000x büyütme (3mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz)



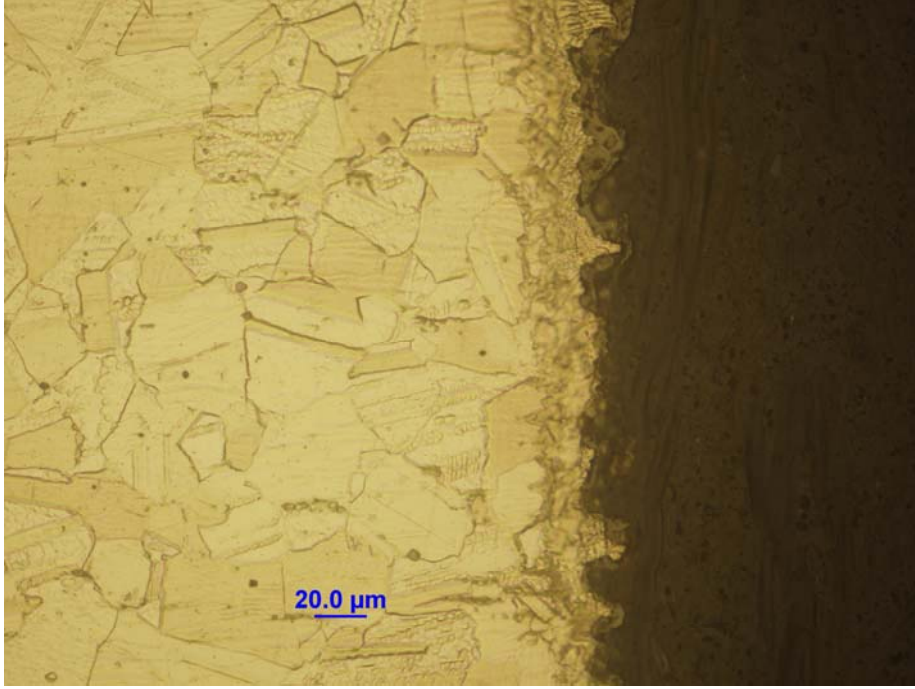
Resim 7.14. ITAB 500x büyütme (3mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz)



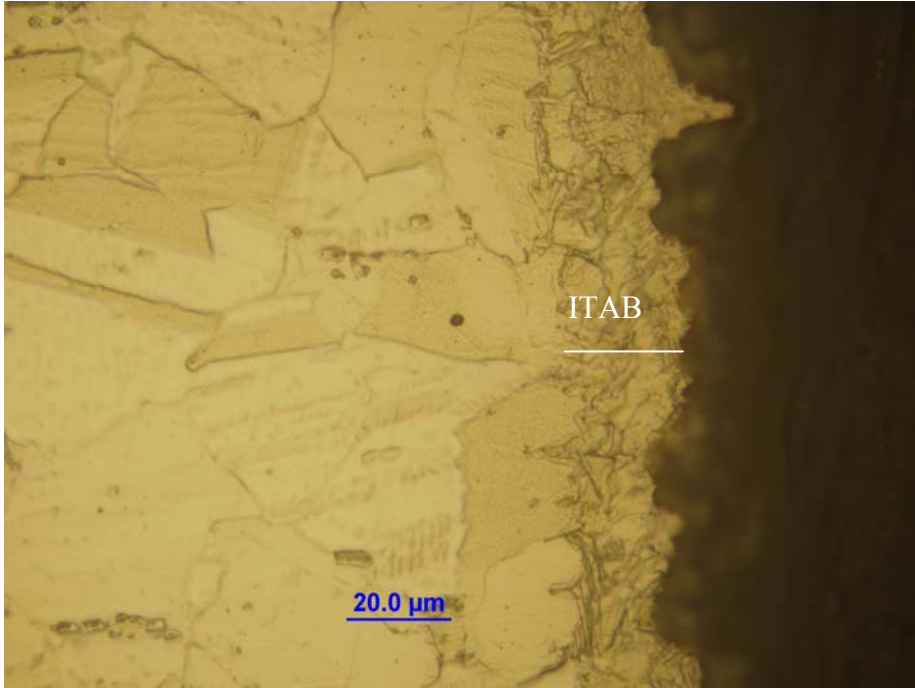
Resim 7.15. ITAB 1000x büyütmeye (3mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz)



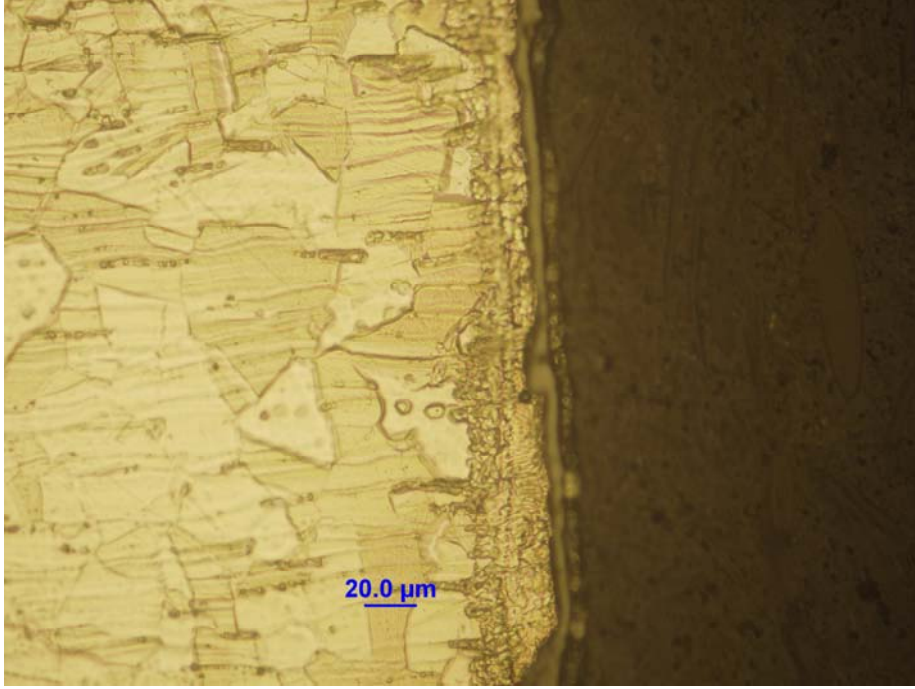
Resim 7.16. ITAB 100x büyütmeye (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz)



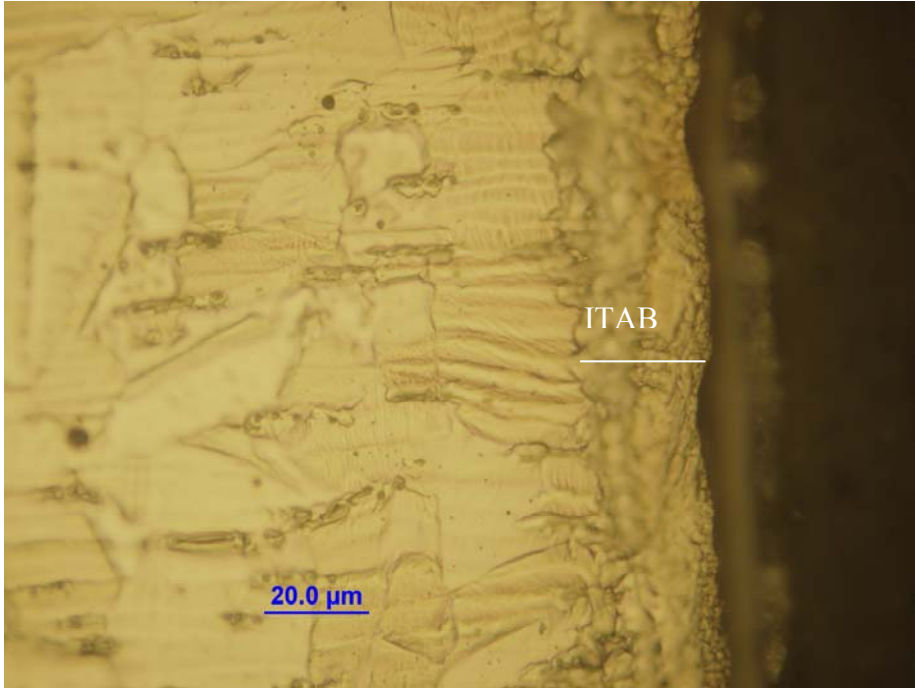
Resim 7.17. ITAB 500x büyütme (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz)



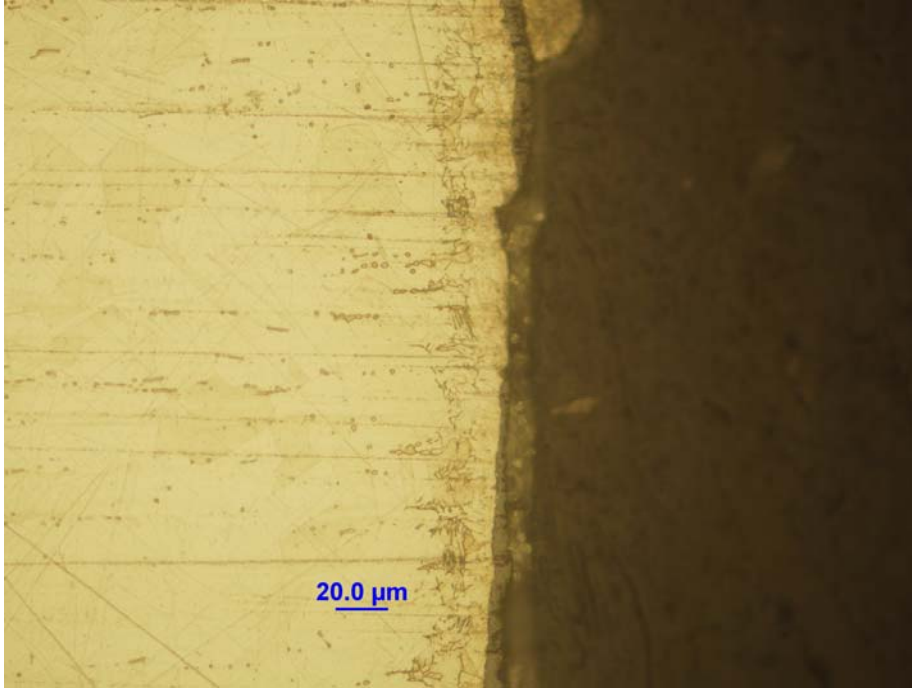
Resim 7.18. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1000W, 200mm/dak, 500Hz)



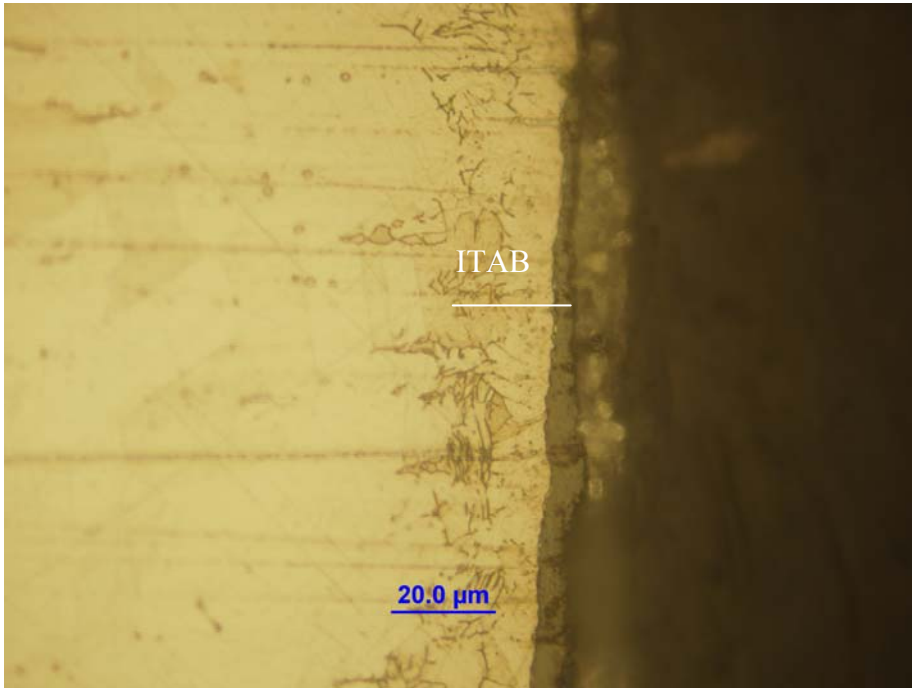
Resim 7.19. ITAB 500x büyütme (4mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz)



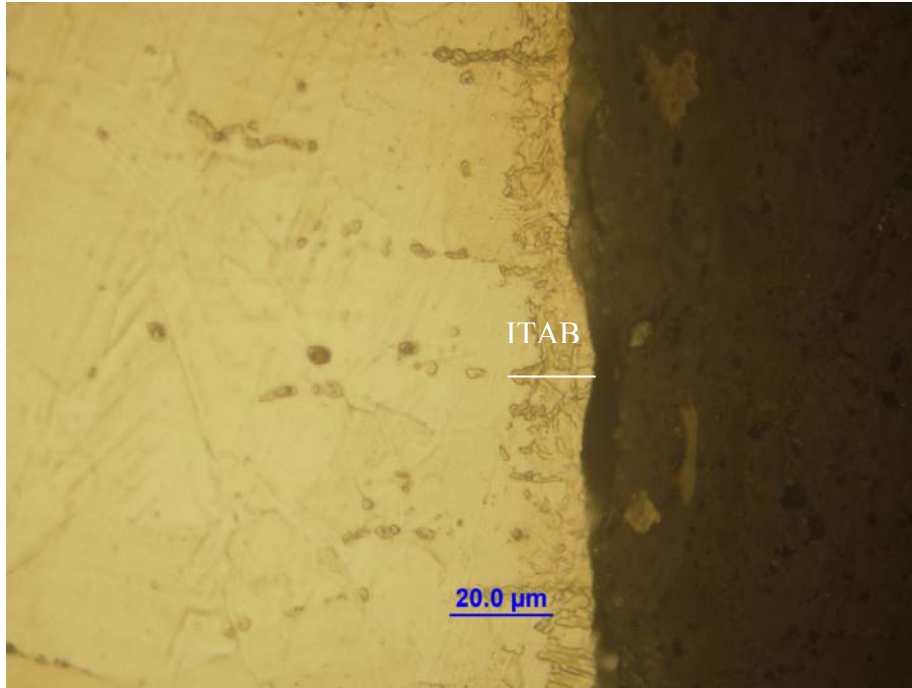
Resim 7.20. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1000W, 300mm/dak, 500Hz)



Resim 7.21. ITAB 500x büyütmeye (4mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz)



Resim 7.22. ITAB 1000x büyütmeye (4mm, 1000W, 350mm/dak, 1500Hz)



Resim 7.23. ITAB 1000x büyütme (4mm, 1600W, 350mm/dak, 1000Hz)

Fotoğraflar photoshop programında incelendiğinde ITAB için Çizelge 7.11'deki sonuçlar elde edilmiştir.

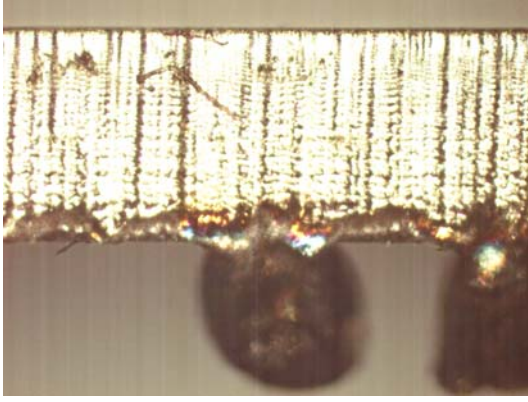
Çizelge 7.1. ITAB genişlikleri

| Parametreler                 | 3mm kalınlıkta ITAB genişliği | 4mm kalınlıkta ITAB genişliği |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1000W ; 200 mm/dak ; 500 Hz  | 21,94 $\mu\text{m}$           | 23,36 $\mu\text{m}$           |
| 1000W ; 300 mm/dak ; 500 Hz  | 23,73 $\mu\text{m}$           | 24,93 $\mu\text{m}$           |
| 1000W ; 350 mm/dak ; 1500 Hz | 30,97 $\mu\text{m}$           | 32,76 $\mu\text{m}$           |
| 1600W ; 350 mm/dak ; 100 Hz  | 24,25 $\mu\text{m}$           | 26,12 $\mu\text{m}$           |

Yapılan incelemeler, ITAB genişliğinin 20 ile 30  $\mu\text{m}$  arasında değiştiğini göstermiştir. Lazer ile kesmede ITAB'ın çok düşük olduğu belirlenmiştir. Lazer ile kesme ITAB'ın az olması istenen kesmelerde tercih edilebilir.

## 7.6. Kenar Oyuklaşmalarının İncelenmesi

Kenar oyuklaşmalarının incelenmesi için kesiklerin yan yüzey fotoğrafları optik mikroskop ile x50 büyütmede çekilmiştir (Resim 7.24 - Resim 7.25). Her kesik için farklı bölgelerden 10 adet, toplamda 2560 adet fotoğraf elde edilmiştir. Yapılan incelemeler kenar oyuklaşmaları ile parametreler arasında somut bir ilişki göstermemiştir.



Resim 7.24. 50x büyütme 1 mm (kesik yüzeyi)



Resim 7.25. 50x büyütme 2 mm (kesik yüzeyi)

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Lazer ile kesmede uygun parametrenin seçimi kesme kalitesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan 304 paslanmaz çeliğin CO<sub>2</sub> ile kesiminde; farklı parametreler kullanılarak kesme hızı, lazer gücü, lazer puls frekansı ve malzeme kalınlığının kesme aralığı ve yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir. Kesme parametrelerinin uygun seçilmesinin kesme kalitesindeki önemi ortaya çıkmıştır.

Kesme aralığı incelemeleri kesme hızı artışının kesme aralığını azalttığını göstermiştir. 1 mm için en düşük kesme aralığı değeri olan 0,39 mm, en yüksek kesme hızı olan 350 mm/dak 'da elde edilmiştir. Yine 1 mm'de en yüksek kesme aralığı olan 0,65 mm, en düşük kesme hızı olan 200 mm/dak 'da görülmüştür. 2 mm, 3 mm ve 4 mm kalınlıklarda da en düşük kesme aralığı en yüksek kesme hızında; en yüksek kesme aralığı en düşük kesme hızı parametrelerinde gerçekleşmiştir.

Lazer gücü artışı kesme aralığını artırmaktadır. En yüksek kesme aralıkları 1600 W lazer gücünde elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar lazer puls frekansının doğru seçilmesinin kesme aralığı için önemli olduğunu göstermiştir. 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekanslarının seçilen parametreler içinde en uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, kesme aralığı malzeme kalınlığı açısından incelendiğinde, malzeme kalınlığındaki artışın kesme aralığını artırdığı görülmektedir.

Kesik bölgeleri incelendiğinde her parametrede kesme işleminin gerçekleştiği görülmüştür. Kesme işleminin gerçekleşmediği bir parametre olmamış, fakat kesiklerin görsel muayenesinde her parametrede dross olduğu gözlenmiştir. Daha kaliteli kesikler için daha uygun parametreler seçilmesi gerekmektedir. Görsel olarak yapılan incelemelerde lazer gücünün düşük, kalınlığın yüksek olduğu parametrelerde dross oluşumunun daha az olduğu

tespit edilmiştir. Dross yüksekliği lazer gücünün artması ile artmaktadır. Lazer puls frekansı ve kesme hızı için herhangi bir genelleme yapılamamıştır.

ITAB'ın 25  $\mu\text{m}$  gibi küçük değerlerde olduğu tespit edilmiştir. İncelenen 8 numunede en düşük ITAB genişliği 3 mm kalınlıkta 1000 W, 200 mm/dak, 500 Hz'de 21,94  $\mu\text{m}$  'dir.

## KAYNAKLAR

1. Ion, J. C., "Laser Processing of Engineering Materials, Principles, Procedure and Industrial Application", **Elsevier.**, 347-360 (2005)
2. Çelik, S., "Lazerler, tıpta ve özellikle göz tedavisindeki uygulamaları" Proje-1, **Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü**, İstanbul, 4: 16-22 (1998).
3. Yilbas, B. S., "Study of parameters for CO<sub>2</sub> laser cutting process" , **Materials and Manufacturing Processes**, 13 (4): 517-536 (1998).
4. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S. H., "CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 43: 351–358 (2003).
5. Uslan, İ., "CO<sub>2</sub> laser cutting: kerf width variation during cutting", **J. Engineering Manufacture** ,219: 571-577 (2005).
6. Yilbas, B. S., "Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis.", **J. Mater. Processing Technol.**, 155/156: 2106–2115 (2004).
7. Ghany, K. A., Newishy, M., "Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser", **Journal of Materials Processing Technology**, 168:438–447(2005).
8. Yilbas, B. S., "Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process", **Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Eng. Manuf.**, 215:1357–1365 (2001).
9. Karataş, C., Keleş, Ö., Uslan, İ., Usta, Y., "Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation" **Journal of Materials Processing Technology**, 172:22–29 (2006).
10. Yilbas, B. S., Davies, R., Yilbas, Z., "Study into penetration speed during CO<sub>2</sub> laser cutting of stainless steel", **Opt. Lasers Eng.**, 17:69–82 (1992).
11. Ready, J. F., "Industrial Applications of Lasers (Second Edition)" Elsevier, 247-271(1997).
12. Nagaraja, D., "Laser Cutting Machine:Justification of initial costs", **Master of Science (Engineering Technology)**, 15-30 (2001)

- 13.Acer, H., “Lazer sistemleri” Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**, Denizli, 1-3(1998).
- 14.Metiner, H., “Lazerin çalışma prensipleri”, **Aselsan**, Ankara, 1-3, 4-5 (1995).
- 15.Türkiye meteoroloji Enstitüsü, “2006 Yılı Araştırmaları”,  
İnternet:<http://www.meteor.gov.tr/2006/arastirma/arastirma-ozon-elektromanyetikspektrum.aspx>
- 16.Tanrıverdi, M. A., “Çelik Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde Kesme Bölgesinin Yapı ve Özelliklerinin İncelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa,15, 10-14 (1995).
- 17.Karaören, K., “Lazer İle Kesim Parametrelerinin Tespiti” Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 11 (1999).
- 18.Cemal, M., “Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları” Yüksek Lisans Tezi, **Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, Antakya, 32-37 (2006).
- 19.Güven, O., Ünal, S., “Lazer Kesme”, Araştırma Yazısı, **Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü**, Mersin, 1-2 (2002).
- 20.Process Specification, “Laser Beam Cutting of Metallic Materials”, **DaimlerChrysler Aerospace Airbus**, 1-10 (1999).
- 21.Process Specification, “Laser cutting of metal”, **Boeing Commercial Aircraft Group**, 1-12 (2000).
- 22.Özel, M., “Lazer Kesim Teknolojisi ve Endüstrideki Uygulamaları”, Araştırma Projesi, **Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü**, Manisa, 13-18 (2005).
- 23.Erdoğan, Ş., “Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 36-40 (2007).
- 24.Ertek, C., “Plazma ortamında iyon aşılınmış 304 ve 316 L paslanmaz çeliklerin korozyon davranışlarının incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, İstanbul,2-16 (2006).

25. Taşdemir, V., "AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğine ısı işlemin etkisi" Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 6-20 (2006)
26. Ray, A. K., "Laser Machining and its thermal effects on silicon nitride and steel", **Doctor of Philosophy, Iowa State University**, 1-21 (1995)
27. Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L. N., Sanchez, J. A., Pel Pozo, D., Etayo, J. M., Lopez, J. M., "CO<sub>2</sub> Laser cutting of advanced high strength steels(AHSS)" **Applied Surface Science**, 242 362-368 (2005)
28. Dubey, A.K., Yadava, V., "Laser beam machining" **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 11-51 (2007)

## EKLER

EK-1 Parametrelere bağılı olarak elde edilen kesme aralığı değerleri

Çizelge 1.1. 1mm kalınlık için kesme aralığı değerleri (mm)

|    | maxw (max kesme aralığı) | minw (min kesme aralığı) | maxv-minw | wave  | dW/wave |
|----|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|---------|
| 1  | 0,563                    | 0,505                    | 0,059     | 0,539 | 0,109   |
| 2  | 0,608                    | 0,461                    | 0,147     | 0,529 | 0,278   |
| 3  | 0,454                    | 0,409                    | 0,045     | 0,432 | 0,104   |
| 4  | 0,493                    | 0,443                    | 0,051     | 0,471 | 0,108   |
| 5  | 0,529                    | 0,443                    | 0,086     | 0,498 | 0,174   |
| 6  | 0,471                    | 0,448                    | 0,022     | 0,460 | 0,049   |
| 7  | 0,503                    | 0,456                    | 0,047     | 0,484 | 0,097   |
| 8  | 0,595                    | 0,503                    | 0,092     | 0,549 | 0,168   |
| 9  | 0,469                    | 0,420                    | 0,049     | 0,445 | 0,109   |
| 10 | 0,474                    | 0,450                    | 0,024     | 0,461 | 0,052   |
| 11 | 0,635                    | 0,510                    | 0,124     | 0,576 | 0,216   |
| 12 | 0,473                    | 0,443                    | 0,030     | 0,462 | 0,065   |
| 13 | 0,488                    | 0,426                    | 0,062     | 0,453 | 0,138   |
| 14 | 0,577                    | 0,493                    | 0,083     | 0,531 | 0,157   |
| 15 | 0,492                    | 0,458                    | 0,034     | 0,470 | 0,073   |
| 16 | 0,481                    | 0,437                    | 0,044     | 0,465 | 0,094   |
| 17 | 0,629                    | 0,488                    | 0,141     | 0,574 | 0,245   |
| 18 | 0,527                    | 0,458                    | 0,070     | 0,501 | 0,139   |
| 19 | 0,514                    | 0,454                    | 0,060     | 0,477 | 0,127   |
| 20 | 0,569                    | 0,471                    | 0,098     | 0,533 | 0,183   |
| 21 | 0,535                    | 0,465                    | 0,070     | 0,497 | 0,141   |
| 22 | 0,518                    | 0,463                    | 0,054     | 0,488 | 0,112   |
| 23 | 0,589                    | 0,509                    | 0,081     | 0,552 | 0,146   |
| 24 | 0,499                    | 0,461                    | 0,038     | 0,477 | 0,079   |
| 25 | 0,482                    | 0,452                    | 0,030     | 0,470 | 0,064   |
| 26 | 0,577                    | 0,499                    | 0,077     | 0,536 | 0,145   |
| 27 | 0,484                    | 0,450                    | 0,034     | 0,465 | 0,073   |
| 28 | 0,465                    | 0,435                    | 0,030     | 0,453 | 0,066   |
| 29 | 0,552                    | 0,469                    | 0,083     | 0,502 | 0,166   |
| 30 | 0,490                    | 0,467                    | 0,022     | 0,476 | 0,047   |
| 31 | 0,458                    | 0,435                    | 0,022     | 0,448 | 0,050   |
| 32 | 0,554                    | 0,471                    | 0,083     | 0,510 | 0,162   |
| 33 | 0,516                    | 0,446                    | 0,070     | 0,492 | 0,142   |
| 34 | 0,539                    | 0,454                    | 0,085     | 0,506 | 0,168   |
| 35 | 0,574                    | 0,460                    | 0,115     | 0,524 | 0,219   |
| 36 | 0,571                    | 0,482                    | 0,089     | 0,529 | 0,168   |
| 37 | 0,493                    | 0,413                    | 0,081     | 0,450 | 0,179   |
| 38 | 0,557                    | 0,445                    | 0,113     | 0,502 | 0,224   |
| 39 | 0,460                    | 0,422                    | 0,038     | 0,439 | 0,086   |
| 40 | 0,495                    | 0,431                    | 0,064     | 0,457 | 0,140   |
| 41 | 0,529                    | 0,411                    | 0,119     | 0,480 | 0,247   |
| 42 | 0,509                    | 0,416                    | 0,092     | 0,466 | 0,198   |
| 43 | 0,520                    | 0,424                    | 0,096     | 0,477 | 0,202   |
| 44 | 0,535                    | 0,431                    | 0,104     | 0,493 | 0,210   |
| 45 | 0,518                    | 0,431                    | 0,086     | 0,483 | 0,179   |
| 46 | 0,481                    | 0,420                    | 0,060     | 0,452 | 0,133   |
| 47 | 0,509                    | 0,431                    | 0,077     | 0,486 | 0,159   |
| 48 | 0,477                    | 0,413                    | 0,064     | 0,438 | 0,146   |
| 49 | 0,467                    | 0,418                    | 0,049     | 0,449 | 0,109   |
| 50 | 0,527                    | 0,441                    | 0,086     | 0,487 | 0,178   |
| 51 | 0,516                    | 0,437                    | 0,080     | 0,478 | 0,166   |
| 52 | 0,471                    | 0,392                    | 0,079     | 0,430 | 0,184   |
| 53 | 0,533                    | 0,435                    | 0,098     | 0,494 | 0,198   |
| 54 | 0,545                    | 0,443                    | 0,102     | 0,484 | 0,211   |
| 55 | 0,505                    | 0,424                    | 0,081     | 0,467 | 0,173   |
| 56 | 0,542                    | 0,433                    | 0,109     | 0,486 | 0,225   |
| 57 | 0,514                    | 0,431                    | 0,083     | 0,483 | 0,171   |
| 58 | 0,495                    | 0,445                    | 0,051     | 0,469 | 0,108   |
| 59 | 0,503                    | 0,426                    | 0,077     | 0,456 | 0,170   |
| 60 | 0,546                    | 0,471                    | 0,075     | 0,506 | 0,149   |
| 61 | 0,492                    | 0,414                    | 0,077     | 0,445 | 0,174   |
| 62 | 0,520                    | 0,439                    | 0,081     | 0,478 | 0,170   |
| 63 | 0,473                    | 0,416                    | 0,056     | 0,445 | 0,126   |
| 64 | 0,477                    | 0,390                    | 0,087     | 0,429 | 0,203   |

EK-1 (Devamı) Parametrelere bağlı olarak elde edilen kesme aralığı değerleri

Çizelge 1.2. 2mm kalınlık için kesme aralığı değerleri (mm)

|    | maxw (max kesme aralığı) | minw (min kesme aralığı) | maxv-minw | wave  | dW/wave |
|----|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|---------|
| 1  | 0.586                    | 0.477                    | 0.109     | 0.542 | 0.201   |
| 2  | 0.629                    | 0.510                    | 0.119     | 0.590 | 0.201   |
| 3  | 0.610                    | 0.525                    | 0.085     | 0.577 | 0.147   |
| 4  | 0.652                    | 0.509                    | 0.143     | 0.602 | 0.238   |
| 5  | 0.621                    | 0.529                    | 0.092     | 0.585 | 0.158   |
| 6  | 0.733                    | 0.572                    | 0.160     | 0.652 | 0.246   |
| 7  | 0.625                    | 0.514                    | 0.111     | 0.580 | 0.191   |
| 8  | 0.603                    | 0.525                    | 0.077     | 0.575 | 0.135   |
| 9  | 0.700                    | 0.482                    | 0.218     | 0.619 | 0.353   |
| 10 | 0.608                    | 0.514                    | 0.094     | 0.573 | 0.164   |
| 11 | 0.533                    | 0.465                    | 0.068     | 0.513 | 0.132   |
| 12 | 0.554                    | 0.452                    | 0.101     | 0.512 | 0.198   |
| 13 | 0.742                    | 0.542                    | 0.200     | 0.669 | 0.299   |
| 14 | 0.554                    | 0.454                    | 0.100     | 0.514 | 0.194   |
| 15 | 0.548                    | 0.467                    | 0.081     | 0.514 | 0.158   |
| 16 | 0.688                    | 0.524                    | 0.164     | 0.625 | 0.262   |
| 17 | 0.592                    | 0.486                    | 0.106     | 0.557 | 0.190   |
| 18 | 0.610                    | 0.486                    | 0.124     | 0.568 | 0.219   |
| 19 | 0.652                    | 0.514                    | 0.138     | 0.594 | 0.232   |
| 20 | 0.592                    | 0.490                    | 0.102     | 0.553 | 0.185   |
| 21 | 0.610                    | 0.495                    | 0.115     | 0.571 | 0.201   |
| 22 | 0.621                    | 0.510                    | 0.111     | 0.586 | 0.189   |
| 23 | 0.586                    | 0.488                    | 0.098     | 0.549 | 0.178   |
| 24 | 0.601                    | 0.499                    | 0.101     | 0.554 | 0.183   |
| 25 | 0.571                    | 0.475                    | 0.096     | 0.549 | 0.175   |
| 26 | 0.552                    | 0.458                    | 0.095     | 0.515 | 0.184   |
| 27 | 0.567                    | 0.456                    | 0.111     | 0.512 | 0.217   |
| 28 | 0.580                    | 0.467                    | 0.113     | 0.542 | 0.209   |
| 29 | 0.533                    | 0.437                    | 0.096     | 0.489 | 0.197   |
| 30 | 0.571                    | 0.446                    | 0.124     | 0.520 | 0.239   |
| 31 | 0.627                    | 0.486                    | 0.141     | 0.564 | 0.251   |
| 32 | 0.588                    | 0.463                    | 0.124     | 0.541 | 0.230   |
| 33 | 0.599                    | 0.501                    | 0.098     | 0.558 | 0.176   |
| 34 | 0.684                    | 0.527                    | 0.156     | 0.608 | 0.257   |
| 35 | 0.661                    | 0.509                    | 0.152     | 0.597 | 0.255   |
| 36 | 0.560                    | 0.450                    | 0.109     | 0.532 | 0.206   |
| 37 | 0.627                    | 0.533                    | 0.095     | 0.590 | 0.160   |
| 38 | 0.561                    | 0.490                    | 0.072     | 0.529 | 0.135   |
| 39 | 0.663                    | 0.510                    | 0.153     | 0.611 | 0.250   |
| 40 | 0.652                    | 0.499                    | 0.153     | 0.602 | 0.253   |
| 41 | 0.601                    | 0.501                    | 0.100     | 0.558 | 0.179   |
| 42 | 0.574                    | 0.458                    | 0.117     | 0.537 | 0.218   |
| 43 | 0.612                    | 0.458                    | 0.155     | 0.561 | 0.276   |
| 44 | 0.608                    | 0.469                    | 0.139     | 0.557 | 0.250   |
| 45 | 0.652                    | 0.507                    | 0.145     | 0.601 | 0.241   |
| 46 | 0.599                    | 0.492                    | 0.107     | 0.552 | 0.194   |
| 47 | 0.572                    | 0.492                    | 0.081     | 0.536 | 0.150   |
| 48 | 0.755                    | 0.552                    | 0.203     | 0.658 | 0.309   |
| 49 | 0.706                    | 0.539                    | 0.168     | 0.646 | 0.259   |
| 50 | 0.592                    | 0.503                    | 0.089     | 0.558 | 0.159   |
| 51 | 0.691                    | 0.533                    | 0.159     | 0.622 | 0.255   |
| 52 | 0.621                    | 0.499                    | 0.122     | 0.582 | 0.210   |
| 53 | 0.604                    | 0.465                    | 0.139     | 0.556 | 0.251   |
| 54 | 0.652                    | 0.537                    | 0.115     | 0.598 | 0.193   |
| 55 | 0.574                    | 0.486                    | 0.089     | 0.544 | 0.163   |
| 56 | 0.710                    | 0.516                    | 0.194     | 0.636 | 0.305   |
| 57 | 0.642                    | 0.552                    | 0.090     | 0.604 | 0.149   |
| 58 | 0.620                    | 0.513                    | 0.107     | 0.579 | 0.185   |
| 59 | 0.580                    | 0.477                    | 0.104     | 0.548 | 0.189   |
| 60 | 0.481                    | 0.382                    | 0.098     | 0.421 | 0.233   |
| 61 | 0.577                    | 0.467                    | 0.109     | 0.536 | 0.204   |
| 62 | 0.589                    | 0.463                    | 0.126     | 0.536 | 0.235   |
| 63 | 0.589                    | 0.490                    | 0.100     | 0.544 | 0.184   |
| 64 | 0.373                    | 0.318                    | 0.055     | 0.341 | 0.161   |

EK-1 (Devamı) Parametrelere bağlı olarak elde edilen kesme aralığı değerleri

Çizelge 1.3. 3mm kalınlık için kesme aralığı değerleri (mm)

|    | maxw (max kesme aralığı) | minw (min kesme aralığı) | maxv-minw | wave  | dW/wave |
|----|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|---------|
| 1  | 0.757                    | 0.580                    | 0.177     | 0.693 | 0.255   |
| 2  | 0.680                    | 0.546                    | 0.134     | 0.609 | 0.220   |
| 3  | 0.748                    | 0.565                    | 0.183     | 0.659 | 0.278   |
| 4  | 0.663                    | 0.545                    | 0.119     | 0.616 | 0.192   |
| 5  | 0.688                    | 0.550                    | 0.138     | 0.635 | 0.217   |
| 6  | 0.672                    | 0.497                    | 0.175     | 0.584 | 0.300   |
| 7  | 0.644                    | 0.513                    | 0.132     | 0.590 | 0.223   |
| 8  | 0.736                    | 0.556                    | 0.180     | 0.665 | 0.272   |
| 9  | 0.569                    | 0.484                    | 0.084     | 0.541 | 0.156   |
| 10 | 0.620                    | 0.499                    | 0.121     | 0.562 | 0.215   |
| 11 | 0.720                    | 0.554                    | 0.166     | 0.654 | 0.254   |
| 12 | 0.584                    | 0.456                    | 0.128     | 0.527 | 0.243   |
| 13 | 0.599                    | 0.501                    | 0.098     | 0.550 | 0.179   |
| 14 | 0.607                    | 0.499                    | 0.107     | 0.559 | 0.192   |
| 15 | 0.592                    | 0.484                    | 0.107     | 0.550 | 0.195   |
| 16 | 0.607                    | 0.495                    | 0.111     | 0.555 | 0.200   |
| 17 | 0.620                    | 0.432                    | 0.187     | 0.565 | 0.332   |
| 18 | 0.700                    | 0.556                    | 0.145     | 0.632 | 0.229   |
| 19 | 0.780                    | 0.612                    | 0.168     | 0.700 | 0.240   |
| 20 | 0.750                    | 0.569                    | 0.181     | 0.684 | 0.265   |
| 21 | 0.650                    | 0.525                    | 0.124     | 0.600 | 0.207   |
| 22 | 0.667                    | 0.495                    | 0.171     | 0.598 | 0.287   |
| 23 | 0.674                    | 0.535                    | 0.139     | 0.613 | 0.227   |
| 24 | 0.710                    | 0.550                    | 0.160     | 0.636 | 0.252   |
| 25 | 0.625                    | 0.539                    | 0.086     | 0.585 | 0.148   |
| 26 | 0.624                    | 0.481                    | 0.143     | 0.569 | 0.252   |
| 27 | 0.680                    | 0.542                    | 0.138     | 0.596 | 0.231   |
| 28 | 0.693                    | 0.540                    | 0.153     | 0.639 | 0.239   |
| 29 | 0.644                    | 0.533                    | 0.112     | 0.591 | 0.189   |
| 30 | 0.738                    | 0.554                    | 0.185     | 0.661 | 0.279   |
| 31 | 0.620                    | 0.552                    | 0.068     | 0.578 | 0.117   |
| 32 | 0.656                    | 0.537                    | 0.119     | 0.597 | 0.199   |
| 33 | 0.639                    | 0.525                    | 0.113     | 0.590 | 0.192   |
| 34 | 0.667                    | 0.539                    | 0.128     | 0.618 | 0.207   |
| 35 | 0.738                    | 0.569                    | 0.170     | 0.674 | 0.252   |
| 36 | 0.691                    | 0.516                    | 0.175     | 0.620 | 0.283   |
| 37 | 0.644                    | 0.484                    | 0.160     | 0.590 | 0.272   |
| 38 | 0.727                    | 0.522                    | 0.206     | 0.650 | 0.316   |
| 39 | 0.723                    | 0.524                    | 0.200     | 0.657 | 0.304   |
| 40 | 0.652                    | 0.529                    | 0.123     | 0.597 | 0.206   |
| 41 | 0.665                    | 0.531                    | 0.133     | 0.621 | 0.215   |
| 42 | 0.657                    | 0.524                    | 0.133     | 0.605 | 0.220   |
| 43 | 0.748                    | 0.582                    | 0.166     | 0.680 | 0.244   |
| 44 | 0.637                    | 0.527                    | 0.110     | 0.605 | 0.182   |
| 45 | 0.688                    | 0.529                    | 0.159     | 0.616 | 0.257   |
| 46 | 0.723                    | 0.550                    | 0.174     | 0.654 | 0.265   |
| 47 | 0.621                    | 0.492                    | 0.130     | 0.567 | 0.229   |
| 48 | 0.718                    | 0.540                    | 0.177     | 0.620 | 0.286   |
| 49 | 0.671                    | 0.545                    | 0.126     | 0.619 | 0.203   |
| 50 | 0.661                    | 0.510                    | 0.151     | 0.605 | 0.249   |
| 51 | 0.678                    | 0.492                    | 0.186     | 0.614 | 0.303   |
| 52 | 0.723                    | 0.539                    | 0.185     | 0.649 | 0.285   |
| 53 | 0.691                    | 0.556                    | 0.136     | 0.637 | 0.213   |
| 54 | 0.721                    | 0.516                    | 0.205     | 0.648 | 0.317   |
| 55 | 0.646                    | 0.529                    | 0.117     | 0.598 | 0.195   |
| 56 | 0.810                    | 0.659                    | 0.151     | 0.747 | 0.202   |
| 57 | 0.706                    | 0.540                    | 0.166     | 0.642 | 0.259   |
| 58 | 0.644                    | 0.522                    | 0.123     | 0.590 | 0.208   |
| 59 | 0.772                    | 0.601                    | 0.171     | 0.693 | 0.247   |
| 60 | 0.755                    | 0.580                    | 0.175     | 0.681 | 0.257   |
| 61 | 0.542                    | 0.399                    | 0.143     | 0.460 | 0.311   |
| 62 | 0.674                    | 0.524                    | 0.151     | 0.609 | 0.247   |
| 63 | 0.780                    | 0.571                    | 0.209     | 0.685 | 0.305   |
| 64 | 0.529                    | 0.441                    | 0.088     | 0.489 | 0.180   |

EK-1 (Devamı) Parametrelere bağlı olarak elde edilen kesme aralığı değerleri

Çizelge 1.4. 4mm kalınlık için kesme aralığı değerleri (mm)

|    | maxw (max kesme aralığı) | minw (min kesme aralığı) | maxv-minw | wave  | dW/wave |
|----|--------------------------|--------------------------|-----------|-------|---------|
| 1  | 0.746                    | 0.599                    | 0.147     | 0.688 | 0.213   |
| 2  | 0.816                    | 0.624                    | 0.192     | 0.743 | 0.259   |
| 3  | 0.780                    | 0.593                    | 0.187     | 0.712 | 0.262   |
| 4  | 0.727                    | 0.546                    | 0.181     | 0.672 | 0.269   |
| 5  | 0.738                    | 0.569                    | 0.170     | 0.667 | 0.255   |
| 6  | 0.740                    | 0.574                    | 0.166     | 0.681 | 0.243   |
| 7  | 0.778                    | 0.584                    | 0.194     | 0.709 | 0.273   |
| 8  | 0.759                    | 0.597                    | 0.162     | 0.694 | 0.234   |
| 9  | 0.708                    | 0.554                    | 0.154     | 0.646 | 0.239   |
| 10 | 0.703                    | 0.552                    | 0.151     | 0.647 | 0.233   |
| 11 | 0.834                    | 0.639                    | 0.196     | 0.757 | 0.259   |
| 12 | 0.761                    | 0.601                    | 0.160     | 0.694 | 0.231   |
| 13 | 0.700                    | 0.531                    | 0.169     | 0.634 | 0.267   |
| 14 | 0.740                    | 0.580                    | 0.160     | 0.679 | 0.235   |
| 15 | 0.755                    | 0.592                    | 0.164     | 0.697 | 0.235   |
| 16 | 0.699                    | 0.533                    | 0.166     | 0.620 | 0.268   |
| 17 | 0.759                    | 0.607                    | 0.153     | 0.703 | 0.217   |
| 18 | 0.740                    | 0.578                    | 0.162     | 0.688 | 0.235   |
| 19 | 0.753                    | 0.589                    | 0.164     | 0.697 | 0.235   |
| 20 | 0.799                    | 0.620                    | 0.179     | 0.724 | 0.247   |
| 21 | 0.852                    | 0.653                    | 0.198     | 0.787 | 0.252   |
| 22 | 0.785                    | 0.614                    | 0.171     | 0.723 | 0.237   |
| 23 | 0.733                    | 0.592                    | 0.141     | 0.677 | 0.208   |
| 24 | 0.802                    | 0.601                    | 0.202     | 0.737 | 0.274   |
| 25 | 0.817                    | 0.650                    | 0.168     | 0.755 | 0.222   |
| 26 | 0.735                    | 0.624                    | 0.111     | 0.696 | 0.160   |
| 27 | 0.785                    | 0.584                    | 0.201     | 0.720 | 0.280   |
| 28 | 0.840                    | 0.648                    | 0.192     | 0.763 | 0.251   |
| 29 | 0.780                    | 0.659                    | 0.121     | 0.735 | 0.164   |
| 30 | 0.852                    | 0.663                    | 0.188     | 0.795 | 0.237   |
| 31 | 0.842                    | 0.640                    | 0.202     | 0.753 | 0.268   |
| 32 | 0.816                    | 0.678                    | 0.138     | 0.775 | 0.178   |
| 33 | 0.678                    | 0.560                    | 0.119     | 0.622 | 0.190   |
| 34 | 0.631                    | 0.452                    | 0.179     | 0.565 | 0.317   |
| 35 | 0.748                    | 0.554                    | 0.194     | 0.676 | 0.287   |
| 36 | 0.650                    | 0.460                    | 0.190     | 0.581 | 0.327   |
| 37 | 0.706                    | 0.525                    | 0.181     | 0.627 | 0.289   |
| 38 | 0.706                    | 0.484                    | 0.222     | 0.640 | 0.347   |
| 39 | 0.616                    | 0.441                    | 0.175     | 0.545 | 0.322   |
| 40 | 0.616                    | 0.465                    | 0.151     | 0.557 | 0.271   |
| 41 | 0.695                    | 0.531                    | 0.164     | 0.636 | 0.258   |
| 42 | 0.567                    | 0.429                    | 0.138     | 0.516 | 0.267   |
| 43 | 0.703                    | 0.507                    | 0.196     | 0.628 | 0.312   |
| 44 | 0.700                    | 0.477                    | 0.224     | 0.632 | 0.354   |
| 45 | 0.699                    | 0.509                    | 0.190     | 0.619 | 0.307   |
| 46 | 0.650                    | 0.486                    | 0.164     | 0.583 | 0.281   |
| 47 | 0.639                    | 0.509                    | 0.130     | 0.598 | 0.217   |
| 48 | 0.635                    | 0.481                    | 0.154     | 0.568 | 0.272   |
| 49 | 0.656                    | 0.527                    | 0.128     | 0.615 | 0.208   |
| 50 | 0.778                    | 0.578                    | 0.200     | 0.698 | 0.286   |
| 51 | 0.671                    | 0.481                    | 0.190     | 0.597 | 0.319   |
| 52 | 0.697                    | 0.539                    | 0.158     | 0.629 | 0.251   |
| 53 | 0.784                    | 0.574                    | 0.209     | 0.694 | 0.302   |
| 54 | 0.665                    | 0.478                    | 0.186     | 0.600 | 0.311   |
| 55 | 0.733                    | 0.481                    | 0.252     | 0.643 | 0.392   |
| 56 | 0.799                    | 0.542                    | 0.256     | 0.716 | 0.358   |
| 57 | 0.627                    | 0.450                    | 0.177     | 0.556 | 0.319   |
| 58 | 0.577                    | 0.437                    | 0.140     | 0.507 | 0.276   |
| 59 | 0.744                    | 0.537                    | 0.207     | 0.674 | 0.307   |
| 60 | 0.629                    | 0.467                    | 0.162     | 0.575 | 0.281   |
| 61 | 0.554                    | 0.409                    | 0.145     | 0.489 | 0.296   |
| 62 | 0.727                    | 0.431                    | 0.296     | 0.618 | 0.478   |
| 63 | 0.750                    | 0.471                    | 0.279     | 0.655 | 0.425   |
| 64 | 0.565                    | 0.441                    | 0.124     | 0.531 | 0.233   |

EK-2 Parametrelere bağılı olarak elde edilen dross yüksekliği değerleri

Çizelge 2.1. tüm kalınlıklar için dross yüksekliği değerleri (mm)

|    | 1mm kalınlık | 2mm kalınlık | 3mm kalınlık | 4mm kalınlık | Güç(W) | Hız(mm/dak) | Frekans(Hz) |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------|-------------|-------------|
| 1  | 0.43         | 0.94         | 0.60         | 0.80         | 1000   | 200         | 100         |
| 2  | 0.55         | 0.90         | 0.78         | 0.57         | 1000   | 200         | 500         |
| 3  | 0.49         | 1.03         | 0.88         | 0.43         | 1000   | 200         | 1000        |
| 4  | 0.48         | 1.07         | 0.94         | 0.79         | 1000   | 200         | 1500        |
| 5  | 0.45         | 0.86         | 0.84         | 0.79         | 1000   | 250         | 100         |
| 6  | 0.57         | 0.94         | 0.72         | 0.60         | 1000   | 250         | 500         |
| 7  | 0.54         | 0.94         | 0.92         | 0.70         | 1000   | 250         | 1000        |
| 8  | 0.45         | 0.94         | 0.66         | 0.38         | 1000   | 250         | 1500        |
| 9  | 0.50         | 0.91         | 0.86         | 0.73         | 1000   | 300         | 100         |
| 10 | 0.44         | 1.24         | 0.85         | 0.70         | 1000   | 300         | 500         |
| 11 | 0.38         | 0.94         | 0.81         | 0.72         | 1000   | 300         | 1000        |
| 12 | 0.41         | 0.97         | 0.71         | 0.79         | 1000   | 300         | 1500        |
| 13 | 0.15         | 0.87         | 1.03         | 0.99         | 1000   | 350         | 100         |
| 14 | 0.34         | 0.90         | 1.04         | 0.81         | 1000   | 350         | 500         |
| 15 | 0.36         | 0.88         | 1.11         | 0.67         | 1000   | 350         | 1000        |
| 16 | 0.35         | 0.94         | 1.07         | 0.95         | 1000   | 350         | 1500        |
| 17 | 0.53         | 1.00         | 0.83         | 0.53         | 1200   | 200         | 100         |
| 18 | 0.41         | 0.73         | 1.31         | 0.70         | 1200   | 200         | 500         |
| 19 | 0.41         | 0.84         | 1.38         | 0.76         | 1200   | 200         | 1000        |
| 20 | 0.38         | 0.71         | 1.34         | 0.83         | 1200   | 200         | 1500        |
| 21 | 0.26         | 0.68         | 1.37         | 0.91         | 1200   | 250         | 100         |
| 22 | 0.35         | 0.76         | 1.42         | 1.09         | 1200   | 250         | 500         |
| 23 | 0.26         | 0.64         | 1.31         | 1.21         | 1200   | 250         | 1000        |
| 24 | 0.27         | 0.52         | 1.29         | 1.35         | 1200   | 250         | 1500        |
| 25 | 0.29         | 0.60         | 1.18         | 1.18         | 1200   | 300         | 100         |
| 26 | 0.35         | 0.65         | 1.25         | 1.29         | 1200   | 300         | 500         |
| 27 | 0.24         | 0.60         | 1.23         | 1.30         | 1200   | 300         | 1000        |
| 28 | 0.17         | 0.51         | 1.26         | 1.18         | 1200   | 300         | 1500        |
| 29 | 0.24         | 0.53         | 1.24         | 1.35         | 1200   | 350         | 100         |
| 30 | 0.24         | 0.67         | 1.19         | 1.35         | 1200   | 350         | 500         |
| 31 | 0.26         | 0.55         | 1.18         | 0.55         | 1200   | 350         | 1000        |
| 32 | 0.27         | 0.66         | 1.18         | 1.43         | 1200   | 350         | 1500        |
| 33 | 0.44         | 1.21         | 1.24         | 0.52         | 1400   | 200         | 100         |
| 34 | 0.46         | 1.19         | 1.27         | 0.41         | 1400   | 200         | 500         |
| 35 | 0.73         | 1.21         | 1.32         | 0.44         | 1400   | 200         | 1000        |
| 36 | 0.54         | 1.26         | 1.26         | 0.43         | 1400   | 200         | 1500        |
| 37 | 0.69         | 1.25         | 1.30         | 0.51         | 1400   | 250         | 100         |
| 38 | 0.55         | 1.19         | 1.36         | 0.43         | 1400   | 250         | 500         |
| 39 | 0.66         | 1.21         | 1.30         | 0.41         | 1400   | 250         | 1000        |
| 40 | 0.74         | 1.33         | 1.33         | 0.49         | 1400   | 250         | 1500        |
| 41 | 0.66         | 1.26         | 1.37         | 0.43         | 1400   | 300         | 100         |
| 42 | 0.74         | 1.46         | 1.29         | 0.37         | 1400   | 300         | 500         |
| 43 | 0.65         | 1.49         | 1.37         | 0.55         | 1400   | 300         | 1000        |
| 44 | 0.77         | 1.16         | 1.28         | 0.50         | 1400   | 300         | 1500        |
| 45 | 0.68         | 1.33         | 1.45         | 0.37         | 1400   | 350         | 100         |
| 46 | 0.65         | 1.20         | 1.40         | 0.58         | 1400   | 350         | 500         |
| 47 | 0.63         | 1.16         | 1.38         | 0.48         | 1400   | 350         | 1000        |
| 48 | 0.60         | 1.35         | 1.45         | 0.63         | 1400   | 350         | 1500        |
| 49 | 0.64         | 1.20         | 1.32         | 0.84         | 1600   | 200         | 100         |
| 50 | 0.58         | 1.33         | 1.34         | 0.76         | 1600   | 200         | 500         |
| 51 | 0.67         | 1.29         | 1.32         | 0.59         | 1600   | 200         | 1000        |
| 52 | 0.39         | 1.50         | 1.31         | 0.69         | 1600   | 200         | 1500        |
| 53 | 0.82         | 1.30         | 1.35         | 0.62         | 1600   | 250         | 100         |
| 54 | 0.77         | 1.26         | 1.34         | 0.42         | 1600   | 250         | 500         |
| 55 | 0.63         | 1.15         | 1.28         | 0.49         | 1600   | 250         | 1000        |
| 56 | 0.76         | 1.65         | 1.34         | 0.56         | 1600   | 250         | 1500        |
| 57 | 0.73         | 0.94         | 1.17         | 0.30         | 1600   | 300         | 100         |
| 58 | 0.74         | 1.18         | 1.32         | 0.48         | 1600   | 300         | 500         |
| 59 | 0.72         | 1.35         | 1.29         | 0.44         | 1600   | 300         | 1000        |
| 60 | 0.73         | 1.26         | 1.31         | 0.50         | 1600   | 300         | 1500        |
| 61 | 0.55         | 1.38         | 1.28         | 0.52         | 1600   | 350         | 100         |
| 62 | 0.41         | 1.35         | 1.24         | 0.39         | 1600   | 350         | 500         |
| 63 | 0.44         | 1.28         | 1.26         | 0.40         | 1600   | 350         | 1000        |
| 64 | 0.65         | 1.41         | 1.30         | 0.43         | 1600   | 350         | 1500        |

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖNER, Ufuk  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 07.03.1977 Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 430 67 04  
 Faks : -  
 e-mail : ufukoner@yahoo.com

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi         | Mezuniyet tarihi |
|--------|-----------------------|------------------|
| Lisans | ODTÜ / Mak. Müh. Böl. | 2001             |
| Lise   | TED Ankara Koleji     | 1995             |

### İş Deneyimi

| Yıl   | Yer   | Görev             |
|-------|-------|-------------------|
| 2004- | TUSAŞ | Tasarım Mühendisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Spor yapmak, kitap okumak