

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN LAZER İLE  
İŞLENMESİ**

**ORKAN BARAN KORKUSUZ**

**KOCAELİ 2021**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN LAZER İLE**  
**İŞLENMESİ**

**ORKAN BARAN KORKUSUZ**

**Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Doç.Dr. Mustafa Özgür BORA**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi** .....

**Dr.Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU**  
**Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi** .....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 18.01.2021**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüz gereksinimlerinde bir makine elemanından beklenen üst düzey özellikler artık geleneksel malzemelerle karşılanamaz olup bu ihtiyaçları yerine getirmek amacıyla özel tekniklerle geliştirilmiş ileri malzemeler olan kompozitler kullanılmaktadır. Takviye edilerek üretilen kompozitlerin aynı hacimde malzeme özellikleri birbirinden son derece farklı bileşenlere sahip olmaları işlenmelerini de zorlaştırmaktadır. Gelişmiş düzeydeki mühendislik malzemelerindeki artış hassas tasarım gereksinimlerini de beraberinde getirmiştir. Bu tür gereksinimlerin karşılanması geleneksel işleme yöntemlerinin kullanımıyla pek mümkün olmamaktadır. Lazer ile malzeme işlenmesi bu konuda öne çıkan gelişmiş işleme tekniklerinden biridir. Bu çalışma kapsamında polimer matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesinde lazerin çalışma prensibinin anlaşılıp kaliteli yüzeylerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde bana sundukları her türlü imkan ve destek için Sayın Doç. Dr. Sinan Fidan'a ve Sayın Doç. Dr. Timur Canel'e teşekkürlerimi sunarım. Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne laboratuvarlarını kullanma imkanı tanıdıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam ve akademik hayatım boyunca bana her zaman yol gösterici olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik'e bana verdiği tüm emekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ocak - 2021

Orkan Baran KORKUSUZ

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....                              | i    |
| İÇİNDEKİLER .....                                    | ii   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                 | iv   |
| TABLolar DİZİNİ .....                                | vi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                 | vii  |
| ÖZET.....  | viii |
| ABSTRACT.....  | ix   |
| GİRİŞ .....  | 1    |
| 1. KOMPOZİT MALZEMELER.....                          | 5    |
| 1.1. Bileşen Malzemeler .....                        | 6    |
| 1.1.1. Takviye malzemeleri.....                      | 6    |
| 1.1.1.1. Partikül takviyeli kompozitler.....         | 7    |
| 1.1.1.2. Fiber takviyeli kompozitler .....           | 8    |
| 1.1.2. Matris malzemeleri .....                      | 10   |
| 1.1.3. Ara yüzey .....                               | 11   |
| 1.2. Kompozit Malzemelerin Uygulamaları.....         | 11   |
| 2. LAZER .....                                       | 14   |
| 2.1. Lazerin Temelleri .....                         | 14   |
| 2.1.1. Lazer ışının özellikleri .....                | 15   |
| 2.1.1.1. Monokromatiklik .....                       | 15   |
| 2.1.1.2. Kolimasyon .....                            | 15   |
| 2.1.1.3. Uyumluluk .....                             | 16   |
| 2.1.1.4. Parlaklık .....                             | 16   |
| 2.1.2. Endüstriyel lazer türleri .....               | 16   |
| 2.1.3. Lazer çalışma modları.....                    | 18   |
| 2.2. Lazer Malzeme Etkileşimi.....                   | 18   |
| 2.2.1. Ablasyon .....                                | 21   |
| 2.3. Lazer İşlemleri.....                            | 25   |
| 2.3.1. Yüzey dokusu .....                            | 26   |
| 2.3.2. Delik delme.....                              | 28   |
| 2.3.3. Kesme .....                                   | 29   |
| 2.4. Lazer Parametreleri .....                       | 31   |
| 2.4.1. Lazer ışını karakteristiği .....              | 32   |
| 2.4.2. Proses parametreleri.....                     | 33   |
| 2.4.2.1. Lazer gücü ve enerji yoğunluğu.....         | 33   |
| 2.4.2.2. Odak noktası boyutu ve odak derinliği ..... | 33   |
| 2.4.3. Geometrik özellikler .....                    | 35   |
| 2.4.3.1. Ablasyon oranı .....                        | 35   |
| 2.4.3.2. Derinlik/çap oranı.....                     | 35   |
| 2.4.3.3. Dairesellik .....                           | 35   |
| 2.4.3.4. Koniklik .....                              | 36   |
| 2.4.3.5. Fıçılama .....                              | 36   |
| 2.4.4. Metalürjik özellikler .....                   | 37   |
| 2.4.4.1. Isı tesiri altındaki bölge.....             | 38   |

|   |    |
|---|----|
| 2.4.4.2. Yeniden katılan katman .....   | 38 |
| 2.4.4.3. Mikro çatlaklar .....  | 38 |
| 2.4.4.4. Fiber şişmesi .....  | 39 |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM.....   | 40 |
| 3.1. Malzemeler .....   | 40 |
| 3.1.1. Karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-eton) .....                                | 41 |
| 3.1.2. Cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid.....                                      | 42 |
| 3.2. Lazer Prosesi .....  | 43 |
| 3.3. İnceleme Yöntemleri .....  | 44 |
| 3.3.1. Stereo mikroskop .....   | 44 |
| 3.3.2. Optik profilometre .....   | 45 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....   | 47 |
| 4.1. Karbon Fiber Takviyeli Poli(eter-eter-eton) Yüzey Dokusu Deneysel Çalışmaları..... | 47 |
| 4.2. Cam Fiber Takviyeli Polifenilen sülfid Yüzey Dokusu Deneysel Çalışmaları.....      | 64 |
| 4.3. Lazer Ablasyonu ile Yüzey Dokusu Oluşturmada Takviye Malzemesi Etkisi.....         | 79 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....   | 86 |
| KAYNAKLAR .....   | 88 |
| KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER .....   | 94 |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 95 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1.  | Kompozit malzemelerin takviye şekillerine göre sınıflandırılması.....  | 7  |
| Şekil 1.2.  | Tabakalı kompozitlerin yapısı.....   | 9  |
| Şekil 1.3.  | Boeing 787'deki kompozit malzeme kullanımı.....  | 12 |
| Şekil 2.1.  | Lazer cihazının temel unsurları.....   | 15 |
| Şekil 2.2.  | Lazer ışını uyumluluk dalgaları.....   | 16 |
| Şekil 2.3.  | Lazer ışınının malzeme ile fiziksel etkileşimi.....  | 18 |
| Şekil 2.4.  | Lazer – malzeme etkileşimi sonucu oluşan termal etkiler.....   | 19 |
| Şekil 2.5.  | Lazer enerjisinin malzeme tarafından soğurulması.....  | 20 |
| Şekil 2.6.  | Bağ ve foton enerjileri.....   | 21 |
| Şekil 2.7.  | Lazer ablasyonu eşik enerjisi a) Emilen lazer yoğunluğunun malzeme derinliğinde dağılımı b) Ablasyon derinliğinin lazer enerjisi ile değişimi..... | 23 |
| Şekil 2.8.  | Ablasyon rejimi şeması.....  | 24 |
| Şekil 2.9.  | Lazer ışını ile delik delme teknikleri.....  | 28 |
| Şekil 2.10. | Lazer ile malzeme kesim prosesi.....   | 30 |
| Şekil 2.11. | Lazer işlemi parametreleri.....  | 32 |
| Şekil 2.12. | Lazer atımının şeması.....   | 32 |
| Şekil 2.13. | Lazer ışını profili.....   | 34 |
| Şekil 2.14. | Odak alanı derinliği.....  | 35 |
| Şekil 2.15. | Koniklik yapısı.....   | 36 |
| Şekil 2.16. | Lazer ile delinmiş deliğin özellikleri.....  | 37 |
| Şekil 2.17. | Metalürjik kusurlar.....   | 37 |
| Şekil 2.18. | Yeniden katılan katman.....  | 38 |
| Şekil 2.19. | Fiber şişmesi.....   | 39 |
| Şekil 3.1.  | Lazer enerjisi emilim spektrumları.....  | 41 |
| Şekil 3.2.  | Lazer düzeneği.....  | 43 |
| Şekil 3.3.  | Leica stereo mikroskop.....  | 45 |
| Şekil 3.4.  | Kullanılan kompozit malzemelerin stereo mikroskop görüntüleri örneği.....  | 45 |
| Şekil 3.5.  | Nanovea optik profilometre.....  | 46 |
| Şekil 3.6.  | Kullanılan kompozit malzemelerin optik profilometre görüntüleri örneği.....  | 46 |
| Şekil 4.1.  | CF – PEEK termal etkileşim kategorizasyonu.....  | 48 |
| Şekil 4.2.  | Ablasyon sonucu yüzey dokusu yapısı.....   | 49 |
| Şekil 4.3.  | Ablasyon sonucu oluşan tepenin kesit görüntüsü.....  | 49 |
| Şekil 4.4.  | Tepelerin yüzeydeki matris erimelerinin grafiği.....   | 50 |
| Şekil 4.5.  | Tepelerin yüzeydeki matris erimleri.....   | 50 |
| Şekil 4.6.  | CF – PEEK matris erimesi grafiği.....  | 51 |
| Şekil 4.7.  | CF – PEEK matris erimesi yüzey görüntüsü.....  | 52 |
| Şekil 4.8.  | CF – PEEK ablasyon oranı grafiği.....  | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.9. CF – PEEK ablasyon oranı kesit görüntüsü.....                               | 54 |
| Şekil 4.10. CF – PEEK dairesellik grafiği.....   | 55 |
| Şekil 4.11. CF – PEEK dairesellik yüzey görüntüsü.....                                 | 56 |
| Şekil 4.12. CF – PEEK derinlik/çap oranı grafiği.....                                  | 56 |
| Şekil 4.13. CF – PEEK derinlik/çap oranı kesit görüntüsü.....                          | 57 |
| Şekil 4.14. CF – PEEK odak farkı matris erimesi grafiği.....                           | 58 |
| Şekil 4.15. CF – PEEK odak farkı matris erimesi yüzey görüntüsü.....                   | 59 |
| Şekil 4.16. CF – PEEK odak farkı ablasyon oranı grafiği.....                           | 59 |
| Şekil 4.17. CF – PEEK odak farkı ablasyon oranı kesit görüntüsü.....                   | 60 |
| Şekil 4.18. CF – PEEK odak farkı dairesellik grafiği .....                             | 61 |
| Şekil 4.19. CF – PEEK odak farkı dairesellik yüzey görüntüsü.....                      | 62 |
| Şekil 4.20. CF – PEEK odak farkı derinlik/çap oranı grafiği.....                       | 62 |
| Şekil 4.21. CF – PEEK odak farkı derinlik/çap oranı kesit görüntüsü.....               | 63 |
| Şekil 4.22. GF – PPS termal etkileşim kategorizasyonu.....                             | 64 |
| Şekil 4.23. Ablasyon sonucu oluşan kabartıların kesit görüntüsü.....                   | 65 |
| Şekil 4.24. Kabartıların yüzeydeki matris erimesi.....                                 | 65 |
| Şekil 4.25. GF – PPS matris erimesi grafiği.....                                       | 66 |
| Şekil 4.26. GF – PPS matris erimesi yüzey görüntüsü.....                               | 67 |
| Şekil 4.27. GF – PPS ablasyon oranı grafiği.....                                       | 68 |
| Şekil 4.28. GF – PPS ablasyon oranı kesit görüntüsü.....                               | 69 |
| Şekil 4.29. GF – PPS dairesellik grafiği.....  | 70 |
| Şekil 4.30. GF – PPS dairesellik yüzey görüntüsü.....                                  | 70 |
| Şekil 4.31. GF – PPS derinlik/çap oranı grafiği.....                                   | 71 |
| Şekil 4.32. GF – PPS derinlik/çap oranı kesit görüntüsü.....                           | 72 |
| Şekil 4.33. GF – PPS odak farkı matris erimesi grafiği.....                            | 73 |
| Şekil 4.34. GF – PPS odak farkı matris erimesi yüzey görüntüsü.....                    | 74 |
| Şekil 4.35. GF – PPS odak farkı ablasyon oranı grafiği.....                            | 74 |
| Şekil 4.36. GF – PPS odak farkı ablasyon oranı kesit görüntüsü.....                    | 75 |
| Şekil 4.37. GF – PPS odak farkı dairesellik grafiği.....                               | 76 |
| Şekil 4.38. GF – PPS odak farkı dairesellik yüzey görüntüsü.....                       | 76 |
| Şekil 4.39. GF – PPS odak farkı derinlik/çap oranı grafiği.....                        | 77 |
| Şekil 4.40. GF – PPS odak farkı derinlik/çap oranı kesit görüntüsü.....                | 78 |
| Şekil 4.41. Farklı takviye şekillerinde matris erimesi kıyası grafiği.....             | 80 |
| Şekil 4.42. Farklı takviye şekillerinde matris erimesi kıyası yüzey görüntüsü.....     | 81 |
| Şekil 4.43. Farklı takviye şekillerinde ablasyon oranı kıyası grafiği.....             | 81 |
| Şekil 4.44. Farklı takviye şekillerinde ablasyon oranı kıyası kesit görüntüsü.....     | 82 |
| Şekil 4.45. Farklı takviye şekillerinde dairesellik kıyası grafiği.....                | 83 |
| Şekil 4.46. Farklı takviye şekillerinde dairesellik kıyası yüzey görüntüsü.....        | 84 |
| Şekil 4.47. Farklı takviye şekillerinde derinlik/çap oranı kıyası grafiği.....         | 84 |
| Şekil 4.48. Farklı takviye şekillerinde derinlik/çap oranı kıyası kesit görüntüsü..... | 85 |

## **TABLolar DİZİNİ**

|  |    |
|--|----|
| Tablo 2.1. Endüstriyel lazer türleri .....                                 | 17 |
| Tablo 3.1. Sürekli karbon fiber takviyeli PEEK'in malzeme özellikleri..... | 42 |
| Tablo 3.2. Kısa cam fiber takviyeli PPS'in malzeme özellikleri.....        | 42 |
| Tablo 3.3. Çalışma parametreleri.....                                      | 44 |





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\mu\text{m}$   | : Mikrometre                                       |
| $\text{CO}_2$   | : Karbondioksit                                    |
| $E$             | : Elastisite modülü, (MPa)                         |
| $E_0$           | : Enerji yoğunluğu, ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )     |
| $E_P$           | : Atım enerjisi, (J)                               |
| $E_{\text{th}}$ | : Eşik yoğunluğu, ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )       |
| $F$             | : Lens sayısı                                      |
| $J$             | : Joule  |
| $\text{ms}$     | : Milisaniye                                       |
| $\text{nm}$     | : Nanometre  |
| $\Theta$        | : Koni açısı, ( $^\circ$ )                         |
| $P_M$           | : Ortalama lazer gücü, (kW)                        |
| $P_P$           | : Ortalama lazer tepe gücü, (kW)                   |
| $\text{PRR}$    | : Darbe tekrarlama frekansı, (Hz)                  |
| $r_s$           | : Minimum odak noktası yarıçapı, ( $\mu\text{m}$ ) |
| $t$             | : Numune kalınlığı, (mm)                           |
| $T_e$           | : Gevşeme süresi, (ms)                             |
| $T_F$           | : İki atım arası zaman, (ms)                       |
| $T_g$           | : Camsı geçiş sıcaklığı, ( $^\circ\text{C}$ )      |
| $T_i$           | : Kafes ısınma süresi, (ms)                        |
| $T_l$           | : Lazer darbesi süresi, (ms)                       |
| $T_P$           | : Atım süresi, (ms)                                |
| $\kappa$        | : Isı yayılım katsayısı                            |
| $\lambda$       | : Dalga boyu, (nm)                                 |
| $\mu_a$         | : Emilim katsayısı                                 |

### Kısaltmalar

|        |   |
|--------|---|
| CF     | : Carbon Fiber (Karbon Elyaf)   |
| CNC    | : Computer Numerical Control (Bilgisayar Destekli Sayısal Kontrol)            |
| GF     | : Glass Fiber (Cam Elyaf)   |
| Nd:YAG | : Neodymium: Yttrium Aluminium Garnet (Neodimiyum: İtiryum Alüminyum Laltaşı) |
| PA6    | : Poliamid 6  |
| PAN    | : Poliakrilonitril  |
| PEEK   | : Poli(eter-eter-keton)   |
| PPS    | : Polifenilen Sülfid  |
| PRR    | : Pulse Repetition Rate (Darbe Tekrarlama Frekansı)                           |
| SEM    | : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)                 |
| UV     | : Ultraviyole   |

## POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN LAZER İLE İŞLENMESİ

### ÖZET

Havacılık ve uzay endüstrileri başta olmak üzere polimer matrisli kompozitlerin konvansiyonel işleme yöntemleriyle işlenmesinde çeşitli sakıncalar ve limitler söz konusudur. Özellikle işleme esnasında fiber matris ara yüzey deformasyonları, fiberlerin kırılması, tabakalı kompozitlerde delaminasyonların oluşması gibi malzemelerin statik ve dinamik özelliklerini olumsuz etkileyecek kusurlar ortaya çıkabilmektedir. Bir diğer yandan malzemelerin mikro ölçekli işlenmesinde ve fonksiyonel yüzeyler oluşturulmasında bilinen yöntemler yetersiz kaldıklarından dolayı tercih edilmemektedir. Lazer ile malzemelerin işlenmesi bu kapsamda ön plana çıkan popüler yöntemlerden biridir. Odaklanmış bir ışın olan lazer ileri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazerin yarattığı yüksek enerji yoğunluğu katı haldeki malzemenin çok hızlı bir şekilde buhar fazına geçmesiyle mekanik hasarlar olmaksızın malzemelerin işlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte termal etkileşim sonucunda oluşan ısıdan etkilenen bölgenin mümkün olan minimum seviyeye sınırlandırılması gerekmektedir. Uygun lazer seçilmesi ve uygun lazer parametreleriyle çalışılması halinde mikronlar mertebesinde, tekrarlanabilir, yüksek kalitede fonksiyonel yüzeyler oluşturmak mümkündür.

Tez çalışması kapsamında iki farklı fiber tipiyle desteklenmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin yüzeyinde lazer ablasyonu ile yüzey dokusu oluşturuldu. Deneysel çalışmalar 5 farklı enerji yoğunluğunda, 5 farklı atım süresinde ve 3 farklı odak alanı mesafesinde, 1064 nm dalga boyuna sahip, Nd:YAG tipi darbeli lazer kullanılarak gerçekleştirildi. Oluşan çukurların yüzey yapısı stereo mikroskop ve optik profilometre aracılığıyla gözlemlendi. Elde edilen sonuçların nihayetinde lazer mekanizmasının çalışma prensibi hakkında çıkarımlar yapıp, kaliteli yüzeylerin eldesi amacıyla parametre optimizasyonu hedeflenmiştir. Isıdan etkilenen bölge lazer malzeme etkileşim süresi ile ilişkili olduğundan dolayı daha kısa atım sürelerinde çalışılması ısıdan etkilenen bölgeyi sınırlandırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Cam Elyaf, Karbon Elyaf, Lazer Ablasyonu, Polimer Matrisli Kompozit, Yüzey Dokusu.

## **LASER MACHINING OF POLYMER MATRIX COMPOSITES**

### **ABSTRACT**

There are various drawbacks and limitations in machining of polymer matrix composites with conventional methods, particularly in the aviation and space industries. Especially during machining, defects such as delaminations, breakage of fibers, fiber matrix interface deformations may occur. These defects adversely affect the static and dynamic properties of materials. On the other hand, known methods are not preferred in micro-scale machining of materials and creating functional surfaces due to their inadequacy. Laser machining is one of the popular methods that stand out in this context. Being a focused beam, laser is commonly used in advanced applications. The high energy density created by the laser enables the solid state material to rapidly transition to the vapor phase, allowing the materials to be machined without mechanical damages. However, the heat affected zone generated as result of thermal interaction should be limited to the minimum possible level. It is possible to create reproducible and high quality functional surfaces on the order of microns if working with appropriate laser parameters.

Within the scope of the thesis study, the surface texture was created by laser ablation on the surface of polymer matrix composites materials reinforced with two different fiber types. Experimental studies were carried out using a Nd:YAG pulsed laser with a wavelength of 1064 nm, at 5 different energy densities, 5 different pulse durations and 3 different focal area distances. The surface structure of the formed cavity was observed with a stereo microscope and optical profilometer. Finally, inferences were made about principle of the laser mechanism and parameter optimization was aimed in order to obtain quality surfaces. Since the heat affected zone is related to the laser material interaction time, working with shorter pulse times limited the HAZ.

**Keywords:** Glass Fiber, Carbon Fiber, Laser Ablation, Polymer Matrix Composite, Surface Texture.

## GİRİŞ

Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üstün mekanik özellikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle havacılık, otomotiv ve enerji enstitüsü gibi hafifliğin, yüksek mukavemetin ve korozyon direncinin önemli olduğu birçok ileri uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer bir malzemenin içine bağlanmış yüksek mukavemetli ve aşındırıcı karbon fiberlerden meydana gelmektedirler [1]. Karbon fiberler yüksek elektriksel ve termal özelliklere sahip olmasının yanı sıra yüksek spesifik elastiklik modülüne ve spesifik mukavemete sahiptirler [2]. Bu özellikleri sebebiyle polimer matrislerinde takviye malzemesi olarak sıklıkla kullanılırlar. Polimer matrisler uzun süre dayanıklılığı sağlarlar, darbe direncine ve katmanlar arası kayma dayanımına katkıda bulunurlar [3]. Karbon fiberler ise malzemenin dayanıklı ve hafif olmasını sağlarlar. Bu yapı fiziksel özelliklere, fiber yönelimine ve laminer düzenlemesine bağlı olarak heterojen ve anizotropiktir [4]. Matris malzemesi olarak kullanılan polimerler arasında Poli(eter-eter-keton) (PEEK) ise termoset reçinelere göre daha yüksek tokluğa ve aşınma direncine sahip bir termoplastik reçinedir. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklıklarında mükemmel mekanik ve kimyasal direnç sunmaktadır [5-6]. Termoplastik bir polimer olan Polifenilen sülfid (PPS) yüksek çalışma sıcaklıklarında dahi mekanik özelliklerini koruması ve boyutsal kararlılığa sahip olmasının yanı sıra kolay işlenebilmesi ve kimyasallara dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı ideal bir matris malzemesidir.

Kompozit malzemeler sadece üstün malzeme özelliklerinden dolayı değil aynı zamanda fonksiyonelliğinden ve tasarım özgürlüğünden dolayı da tercih edilmektedir. Heterojen ve anizotropik yapılarından dolayı kullanım amacına uygun tasarım avantajı sağlarlar. Kompozit yapıların istenilen şekle getirilmesi ve montajı için kesme, delik delme, işleme gibi çeşitli işlemler gerekli olmaktadır. Lazer işleme yüksek mukavemetli, sert, ısı dayanımı yüksek malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Havacılık, uzay, otomotiv, kimya, tıp gibi birçok çalışma alanlarında yüzey dokusu oluşturma, yüzey işleme, kanal açma, delme, kesme, kaynak gibi işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek çalışma hızı, süreklilik ve tekrarlanabilirlik

özelliklerinden dolayı geleneksel yöntemlerle elde edilemeyecek boyutlarda ve hassasiyette yüzeyler elde edilir. Geleneksek yöntemlerde karbon fiberlerin aşındırıcı etkisinden dolayı takım aşınması meydana gelmektedir. Bununla birlikte sıcaklığın bölgesel artışı gerilmelere, matriste çatlamalara ve delaminasyonlara sebep olmaktadır. Lazer malzeme ile temassız bir işlem olduğundan ve yarattığı yüksek enerji yoğunluğuyla malzemede termal ablasyon meydana getirdiğinden dolayı bu ve benzeri mekanik hasarlar görülmez. Bu sebeplerden dolayı lazer, anizotropik yapıya sahip ve aşındırıcı takviyeleri olan kompozitlerin işlenmesinde umut verici bir alternatif yöntemdir [7-8].

Lazer yüksek enerjiye ve termal etkiye sahip bir yöntem olduğu için bir buharlaşma sıcaklığı olan ve ısı iletkenliği karbon fiberlerden daha düşük olan polimer matrislerin işlenmesinde ısı tesiri altındaki bölge, elyaf şişmesi, matris bozunması gibi çeşitli termal ve metalürjik kusurlar meydana gelebilir [9]. Lazerin kompozit malzemelerle etkileşiminde, kompozitlerin çok farklı özelliklere sahip malzemelerden oluşmaları, heterojen ve anizotropik yapıya sahip olmaları bazı üstünlükler sağlamasına rağmen işlenmelerini zorlaştırmaktadır. Isı emiliminde ve iletiminde bir takım zorluklarla karşılaşmaktadır. Polimer matris malzemesinin karbon elyaf takviye malzemesine göre daha düşük erime sıcaklığına, ısı transfer kapasitesine ve iletkenliğe sahip olması ve farklı kristallik değerlerinden dolayı istenilen geometride ve konumda, minimum derecede yapısal ve termal hasarların elde edilmesi zordur [10]. Darbeli bir lazerin kullanımında düşük enerji girişinde dahi matrisin hasarı kaçınılmazdır. Küçük bir alana büyük ısı girdisi sebebiyle elyafların kimyasal bozulması sonucu fiber şişmesi gözlemlenir [1, 4].

Yüze gönderilen lazer ışınının enerjisi malzeme tarafından emilerek termal enerjiye dönüştürülür. Sıcaklık artışı termal gerilmelere sebep olur ve malzeme çıkarılması meydana gelir. Foto-termal etkileşimlerle malzeme çıkarma işlemi termal ablasyon olarak adlandırılır [11]. Ablatif işlemin temel karakteri dalga boyu ile ilişkili olan foton enerjisi ile ilişkilidir. Bağ kopmasının foto-kimyasal veya foto-termal doğası iş parçası malzemesinin bileşimine, dalga boyuna ve atım süresine bağlıdır. Üretilen yüksek enerjili lazer ışını yüzeyde malzeme çıkarımı meydana getirir. Polimer matris çıkarılır ve dar bir alanda fiber buharlaştırılır böylece plazma oluşumu darbe süresi ile sınırlı bir davranışa sahiptir [12].

Yüzey özellikleri kompozit malzemeler için oldukça önemlidir. Yüzey modifikasyonları kompozitlerin tribolojik özelliklerini geliştirmektedir. Sürtünme ve aşınma davranışları yüzey pürüzlülüğü ile alakalıdır. Yüzey dokusu malzemelerin tribolojik performansını geliştirmek için kullanılan yüzey modifikasyonlarından bir tanesidir. Lazer ablasyonu ile yüzey dokusu oluşturma öne çıkan yöntemlerden biridir. Tribolojik etkileşimlerde çukurların faydalı etkisi sürtünme katsayısını düşürmesinin ve aşınma performansını arttırmasının yanı sıra yetersiz yağlama şartları altında aşınma artıklarını yakalayıp hapsetmek için yağ haznesi görevi görmesidir [13].

Lazer parametreleri lazer işleminin kalitesini önemli bir şekilde etkiler. Uygun lazerin seçilmesi ve uygun parametrelerle çalışılması halinde mikronlar mertebesinde, tekrarlanabilir, yüksek kalitede fonksiyonel yüzeyler oluşturmak ve malzemeyi işleyebilmek mümkündür. İşleme uygun lazer parametreleriyle çalışılmaması halinde istenen geometrinin elde edilememesine, termal hasarlara, metalürjik kusurlara ve malzeme kaybına yol açabilir. Uygulamalarda maksimum verimlilik için çukurların istenilen geometride minimum malzeme hasarı ile oluşturulması gerekmektedir. Termoplastiklerin işlenmesi değişken kristallik, düşük erime ve cam geçiş sıcaklığı özelliklerinden dolayı metal ve seramiklerin işlenmesine göre daha zordur. Bu yüzden uygun lazerin ve parametrelerinin seçimi oldukça önemlidir.

Lazerin iyi odaklanma özelliği, yüksek tepe gücü ve kısa dalga boyu özellikleri nedeniyle ileri düzey malzemelerin işlenmesinde kullanımı hızla artmaktadır. Bu yüzden bu alanda potansiyellerin keşfedilmesi için ileri malzemeler üzerinde daha fazla ve detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Literatürde araştırmacılar tarafından demir, demir dışı, süper alaşım, seramik, kompozit gibi farklı türdeki malzemelerin lazer ile işlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır fakat polimer ve kompozitlerinin lazer ile işlenmesinin tam olarak keşfedilmesiyle ilgili yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesinde doğacak olan söz konusu kusurların anlaşılması için daha fazla çalışmaların yapılması gerekmektedir. Çoğu araştırmacı ısı tesiri altındaki bölge üzerine çalışmış, ısı ve stres dağılımı analizi yapmıştır ancak mikro yapı üzerine mikro çatlak oluşumu, fiberlerin ve matrisin davranışı konusunda yeterince çalışma bulunmamaktadır. Özellikle elyaf takviyeli polimerler ile ilgili metalürjik kalite analizi üzerine çalışma yapılması konusunda ihtiyaç vardır. Deneysel çalışmaların çoğunda

tek seferde sadece bir parametre değiştirilerek lazer parametrelerinin işlem kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır fakat birkaç farklı parametrenin eş zamanlı olarak değiştirildiği yeterince çalışma yoktur. Birden çok parametrenin eş zamanlı değişiminde çok sayıda deney gerektiği için Taguchi Yöntemi gibi deney sayısını azaltıcı yöntemler kullanılmaktadır. Aynı alışma parametrelerinin farklı malzemeler üzerindeki etkisini araştıran yeterince çalışma bulunmamaktadır. Farklı fiber takviye türünün ve şeklinin lazer ablasyonu üzerindeki etkisinin anlaşılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı mikro saniyeler mertebesinde lazer darbeleri kullanarak lazer ışını yörüngesi boyunca düzgün bir şekilde malzeme çıkarımını sağlamaktır. Lazer malzeme etkileşiminde farklı lazer çalışma parametrelerinin fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üzerindeki etkilerini inceleyip meydana gelebilecek kusurları en aza indirecek ve kullanım alanına uyarlayacak parametre optimizasyonunu yapmaktır. Aynı zamanda aynı çalışma şartlarında farklı tipteki ve yönelimdeki fiberlerin davranışını incelemektir.

Polimer matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesinin anlaşılması yönünde, çalışmanın 1.Bölümünde Kompozit Malzemeler başlığı altında deneysel çalışmada tercih edilenler öncelikli olmak üzere kompozit malzemeler ve özellikleri ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. 2. Bölümde Lazer başlığı altında lazer işleminin temellerine, malzeme ile ilişkisine, işlemlerine ve parametrelerine değinilmiştir. 3. Bölümde Malzeme ve Yöntem başlığı altında deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler tanıtılmış, lazer işleminin gerçekleştirildiği çalışma prosesi hakkında bilgiler verilmiştir. 4. Bölümde Bulgular ve Tartışma başlığı altında elde edilen veriler grafikler ve görseller yardımıyla sunulup değerlendirilmiştir.

## 1. KOMPOZİT MALZEMELER

Günümüz gereksinimleri gereği birçok çalışma alanında ileri düzeyde gelişmiş makine ve donanımlarının kullanımı zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Denizaltından uzaya, kimyasal ortamlardan yüksek sıcaklık koşullarına, biyo uyumluluk gerektiren durumlardan yüksek dayanım gerektiren kullanım alanlarına kadar geniş çalışma alanlarında yüksek özellikli yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bir makine elemanları malzemelerinden beklenen özellikler artık konvansiyonel malzemelerle karşılanamayacak derecede yüksektir. Modern uygulamalarda yüksek performanslı, yüksek mukavemetli, düşük ağırlıklı ve düşük maliyetli yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır ve konvansiyonel malzemeler bu ihtiyaçların önemli bir bölümünü karşılayamamaktadır. Bu gereksinimlere cevap vermek üzere çok özel tekniklerle geliştirilmiş ileri malzemeler olan kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır [14-15].

Kompozit malzemeler, ayrı malzemelerden gerekli özellikleri sağlamak üzere iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik olarak bileşimi ile elde edilen yeni malzemelerdir. Şekil ve kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki adet makro bileşenin birleşimi ile meydana gelirler. Makro ölçüde heterojen karakterli bir yapıya sahiptirler. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmezler ve kimyasal olarak asal davranırlar. Metal alaşımlarının aksine kompozit malzemenin bileşenleri kendi özelliklerini korurlar. Kompozit malzemeler özel kullanım yerlerine uygun iki veya daha fazla sayıdaki spesifik malzemeyi istenilen şekil, miktar ve üretim teknolojisi ile bir araya getirme imkanı sağlayarak klasik malzemeler ile elde edilemeyen mekanik, kimyasal, elektriksel, biyo-uyumluluk, ısıl direnç gibi özellikleri yerine getirir. Aynı zamanda kullanım yeri ve amacına göre makine elemanlarının istenilen bölgelerine gerilme, termal zorlanma, kimyasal ortam gibi dış etkilere uygun anizotropik ve heterojen tasarım yapabilme imkanı sağlarlar. Kompozit malzemelerin en önemli özellikleri çok yüksek spesifik mukavemet ve



spesifik modüle sahip olmalarıdır. Minimum ağırlıkta çok daha fazla yük taşıyabilme kabiliyetleri yüksektir [14-15].

Bir kompozit malzemenin mekanik, kimyasal vb. özelliklerine etki eden üç temel bileşen söz konusudur. Bu bileşenler ana matris malzemesi, takviye edici malzeme ve bileşenlerin birbiri ile bağlanma karakteristiğini belirleyen ara yüzeydir. Bileşenlerinin geometrisi ve dağılımı kompozit malzemenin özelliklerini etkilemektedir. Takviye malzemesi genellikle daha sert ve dayanımlıdır, matrisin dayanım, modül, sertlik, tokluk gibi mekanik özelliklerini iyileştirme rolü oynar. Matris malzemesinin rolü ise takviyeleri çevrelemek, birleştirmek ve yükü üzerlerine dağıtmaktır. Ara yüzey fiber ve matris arasındaki iki fazın birleşme düzlemdir [16].

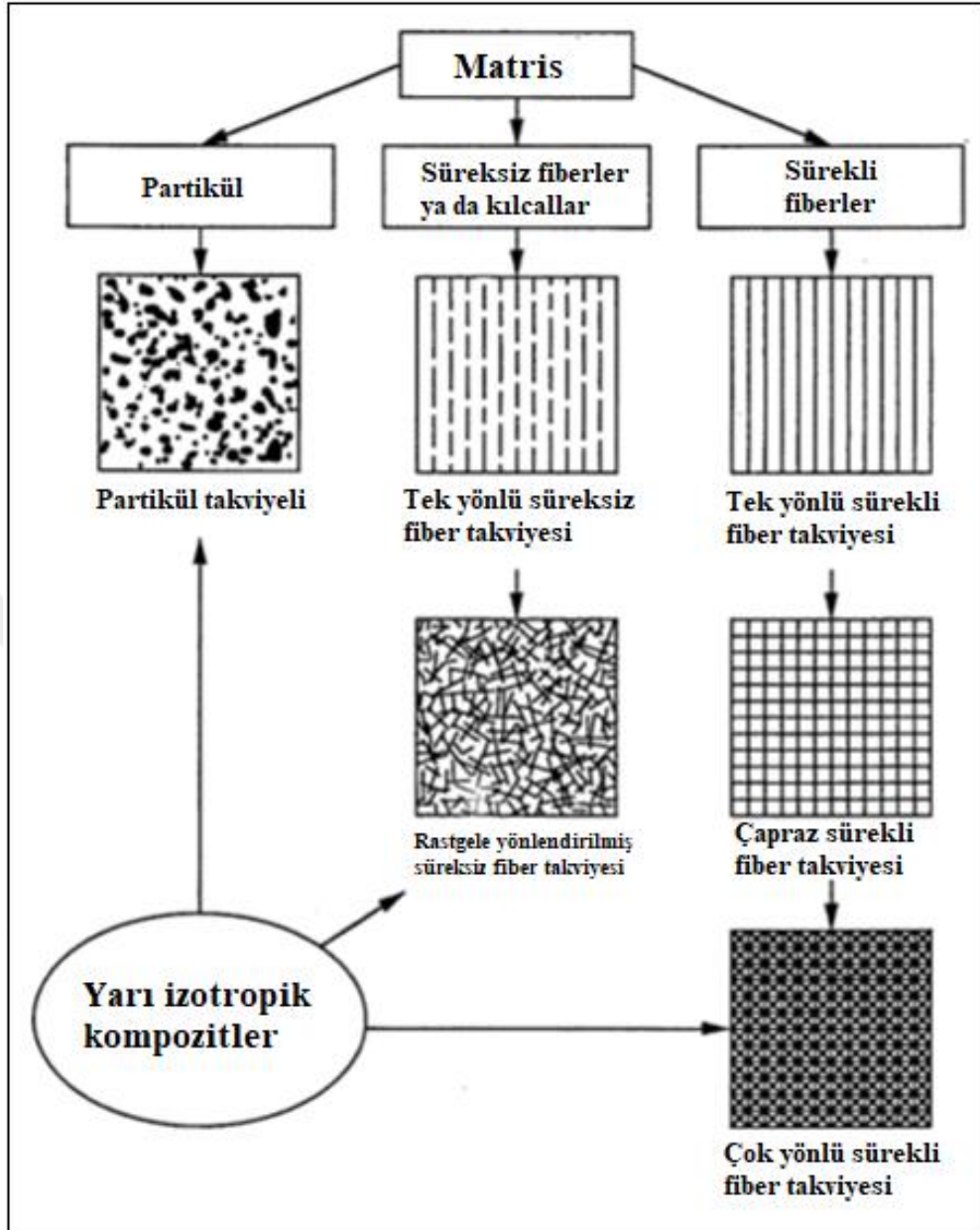
Kompozit malzemeler metallere kıyasla üstün mukavemet/ağırlık oranlarından dolayı havacılık, otomotiv, enerji gibi ileri birçok endüstrilerin uygulamalarında geniş kabul görmüştür. Eşsiz özellikleri, anizotropik ve heterojen yapıları dolayısıyla işlenmeleri zordur [17]. Bu bölümde lazer ile etkileşimlerinde malzeme tepkilerini anlayabilmek için kompozit malzemelere genel bir bakış sunulmuştur.

## **1.1. Bileşen Malzemeler**

### **1.1.1. Takviye malzemeleri**

Takviye malzemeleri matris malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Takviye edici bileşenlerin geometrileri takviye edilmedeki etkinlik göz önüne alınarak seçilir. Kompozitlerin mekanik özellikleri takviye malzemelerinin şekilleri ve boyutlarının bir fonksiyonudur. Fiberler, partiküller ve kılcal kristaller takviye elemanı olarak kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler Şekil 1.1’de gösterildiği gibi takviye edici elemanların tipine, geometrisine ve yönüne göre kategorize edilebilir [18];



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin takviye şekline göre sınıflandırılması [18]

#### 1.1.1.1. Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeleri kompozitlerin genellikle modül değerlerini, aşınma dayanımını, ısıl kararlılıklarını, sertliklerini artırır. Kompozitlerin mekanik özelliklerini fiberler kadar önemli derecede değiştirmezler fakat maliyeti azaltırlar. Malzeme içerisinde her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlara sahiptirler. Kübik, küresel, düzlemsel, tek tip veya farklı tip geometrilerde olabilirler. Partiküllerin malzeme içerisindeki dizilişleri rastgele veya yönlendirilmiştir. Yönlendirilmiş partikül takviyesi ile belirli yönlerde

güçlendirme, özel zorlanmalara karşı tasarımlar yapılabilirken özel olmayan uygulamalarda rastgele dağılım söz konusudur [19].

### **1.1.1.2. Fiber takviyeli kompozitler**

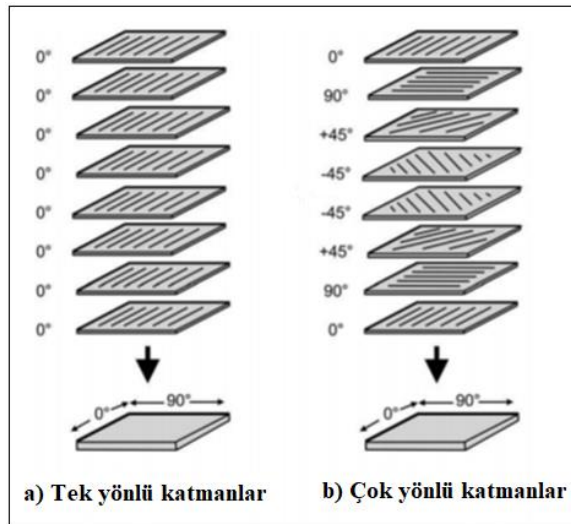
Fiberler aynı zamanda lifler ve elyaflar olarak da adlandırılmaktadırlar. Fiber takviye elemanlarının boyu kesit boyutlarından çok daha fazladır. 5 - 20  $\mu\text{m}$  arasında değişen çaplara sahip fiberler, yüksek mukavemet ve sertlikleri nedeniyle gelişmiş kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviyelerdir. Yaygın olarak tek yönlü sürekli fiber takviyesi kullanılmaktadır fakat uygulamaya bağlı olarak süreksiz fiber takviyeleri de söz konusudur. Fiberlerin yüksek boy/çap oranı yüksek mukavemet ve rijitlik anlamına gelmektedir. Kompozit malzemelerde en yüksek mukavemet ve rijitlik değerlerine tek yönlü sürekli fiber takviyeleriyle ulaşılır. Kısa fiber takviyelerin oryantasyonları ise genellikle rastgele veya yönlendirilmiş şekildedir. Rastgele yönlenmiş kısa fiber takviyeli kompozitlerde iki boyutlu izotropi elde edilir. Bunların yanı sıra fiberlerin kumaş şeklinde örülmesi ile örgü yapılı, relatif açılarla yerleştirilmeleri ile çok yönlü kompozit malzemeler de üretilmektedir [15].

Kompozit malzemelerde genellikle takviye olarak karbon, cam, aramid, bazalt ve bor elyaflar kullanılmaktadır. Kullanılan fiber tipleri arasında karbon fiberler gelişmiş kompozitler için en yaygın olarak kullanılan takviyelerden biridir. Sentetik inorganik malzemelerdir. Yüksek dayanım, yüksek modül ve aşınma direncine sahiptirler. Yoğunlukları son derece düşüktür. Kompozit malzemeye üstün mekanik özellikler ve düşük yoğunluk kazandırır. Spesifik mukavemet ve spesifik modül değerleri oldukça yüksektir. Ayrıca iyi elektrik iletkenliği, iyi ısı iletkenlik ve düşük ısı genişleme katsayısına sahiptirler. Dayanım, bükülmezlik, hafiflik, üstün yorulma karakteristiği gibi kritik gereksinimlerin olduğu ve bununla birlikte yüksek sıcaklık, kimyasal inörtlük, yüksek titreşim sönümlemesinin önemli olduğu yerlerde kullanımları uygundur. Ultra yüksek modüllü, yüksek modüllü, orta modüllü ve yüksek dayanımlı olmak üzere farklı sertlik, dayanım, modül değerlerine sahip birçok formu mevcuttur. Erime noktaları diğer elyaflara kıyasla daha yüksektir [20].

Cam fiberler sentetik inorganik malzemelerdir. Yüksek dayanıma ve nispeten düşük çekme modülüne sahiptirler. Cam fiberler üretim yöntemlerine ve kimyasal içeriklerine göre A camı, E camı, C camı, S camı olmak üzere dörde ayrılmaktadır. A

camı şişelerde ve pencerelerde yaygın olarak kullanılan yüksek oranda alkali içeren cam çeşididir ve kompozitlerde çok fazla tercih edilmez. E camı elektrik uygulamalarında tercih edilir. İyi bir elektrik yalıtkanıdır, yüksek dayanıma, yüksek modüle ve sertliğe sahiptir. Çoğunlukla filaman sarma üretiminde kullanılır. C camı kimyasal korozyona son derece dayanıklı olduğundan korozyona dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Depolama tankı, basınçlı kap gibi yerlerde kompozitleri korozyon etkilerinden korumak için dış tabakada bir koruyucu tabaka olarak kullanılır. S camı yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve E camına kıyasla daha rijittir ve dayanımı daha yüksektir. Maliyeti daha fazla olduğundan dolayı havacılık ve savunma endüstrilerinde kullanılmaktadır [21].

Tabakalı kompozitler fiber takviyeli kompozitlerin bir başka çeşididir. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde fiberler polimer bir kumaş üzerinde tek yönlü yönlendirilmiştir. Gereken mukavemeti ve sertliği elde edebilmek için elyaf tabakaları uygun sayılarda, açılarda ve yönlerde yerleştirilerek çok katmanlı, çok yönlü bir yapı oluşturulur ve tabakalı kompozit üretimi sağlanır. Tabakalı kompozitlerin yapısı Şekil 1.2'de gösterilmektedir [22];



Şekil 1.2. Tabakalı kompozitlerin yapısı [22]

Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin özellikleri homojen ve izotropik kabul edilen metal ve polimerlerden daha farklıdır. Mekanik, fiziksel ve termal özellikler elyaf katkısının oranına, türüne, yönüne bağlı olarak değişir. Katmanlar arasında farklı yönlü elyafların kullanılması kompozit malzemenin nihai mekanik ve

termal özelliklerinde anizotropikliğe ve heterojenliğe neden olur. Örneğin tek yönlü yapılarda liflere paralel mekanik özellikler maksimumdur, liflerin enine doğrultuda ise çoğunlukla matrisinkiyle eşdeğerdir [23].

Bileşenlerin elyaf oryantasyonu ve termal özellikleri de fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin termal davranışını etkiler. Örneğin elyaf boyunca ısıl iletkenlik dik yöndekinden çok daha yüksektir. Isı elyaflar boyunca polimer matristen daha hızlı iletilir. Termal özelliklerdeki bu farklılık malzemenin ısı etkisine karşı çok farklı tepkiler vermesine sebep olur. Bu malzemelerin lazerle işlenmesi sırasında fiberler matristen son derece farklı bir sıcaklıkta buharlaşır. Bu durum malzemelerin işlenmesini zorlaştırır. Bu sebeple lazer ile malzeme işlenmesinde yüksek kalite elde etmek için lazer mekanizmasının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

### **1.1.2. Matris malzemeleri**

Matris malzemelerinin özellikleri içerlerine karıştırılan takviye elemanları vasıtasıyla iyileştirilir. Matrisler takviyeleri birleştirerek uygun şekilde tutar, gelen yükü üzerlerine dağıtırlar ve onları çevreleyerek dış ortamdan korurlar [18].

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Malzeme özellikleri açısından polimerler düşük dayanımlıdır ve düşük elastisite modülü değerlerine sahiptirler. Seramikler yüksek mukavemetli, rijit ve kırılındırlar. Metaller ise orta düzeyde dayanım ve modül değerlerine sahiptirler ve sünekler. Seramikler haricindeki çoğu matris malzemesi elyaflar kadar güçlü değildir. Metal ve seramik matrisleri yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılmaktadır. Polimer matrislerinin düşük bozunma sıcaklıkları kompozitlerin genel servis sıcaklığını sınırlar [14-16, 22].

Kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Ucuz ve üretimi kolay malzemeler olmalarına karşın mekanik özellikleri çoğu yerde kullanıma elverişli değildir. Dayanım ve modül değerleri, rijitlikleri seramiklere ve metallere kıyasla oldukça düşüktür. Aynı zamanda düşük kullanım sıcaklıkları bir diğer dezavantajlarıdır. Takviye edilmeleri halinde ise kompozitleri spesifik mukavemet ve spesifik modül değerleri oldukça yüksek malzemeler haline gelirler.

Polimerler termosetler, termoplastikler ve elastomerler olmak üzere üç ana sınıfa ayrılırlar. Polimer malzemelerin mekanik, kimyasal, elektriksel gibi her türlü özellikleri mikro yapıları ile yakından ilişkilidir. Üretim parametreleri, ısıl işlemler, yapı bileşenleri aynı malzemenin özellikleri çok farklı şekilde etkileyebilmektedir. Çok farklı malzemelerle takviye edilebilmeleri imkanı çok geniş bir yelpazede malzeme üretimi ve seçimini mümkün kılmaktadır. Polimerler üstün karakteristik özelliklere sahiptirler. Kuvvetli asitlere ve bazlara karşı direnç, yüksek ısıl direnç, oldukça iyi elektriksellik, atomik oksijen radyasyonuna direnç, korozyona direnç, biyo uyumluluk gibi son derece üstün ve tercih edilebilir özelliklere sahiptirler. En büyük dezavantajları ise düşük çalışma sıcaklığı, radyasyon ve neme duyarlılık, yüksel termal genişleme ve düşük boyutsal stabiliteleridir. Fakat uygun takviyeler sonucu polimer kompozitleri bu dezavantaj yaratacak olumsuz özellikleri iyileştirilmiş nitelikli malzemeler haline almaktadır [14-15].

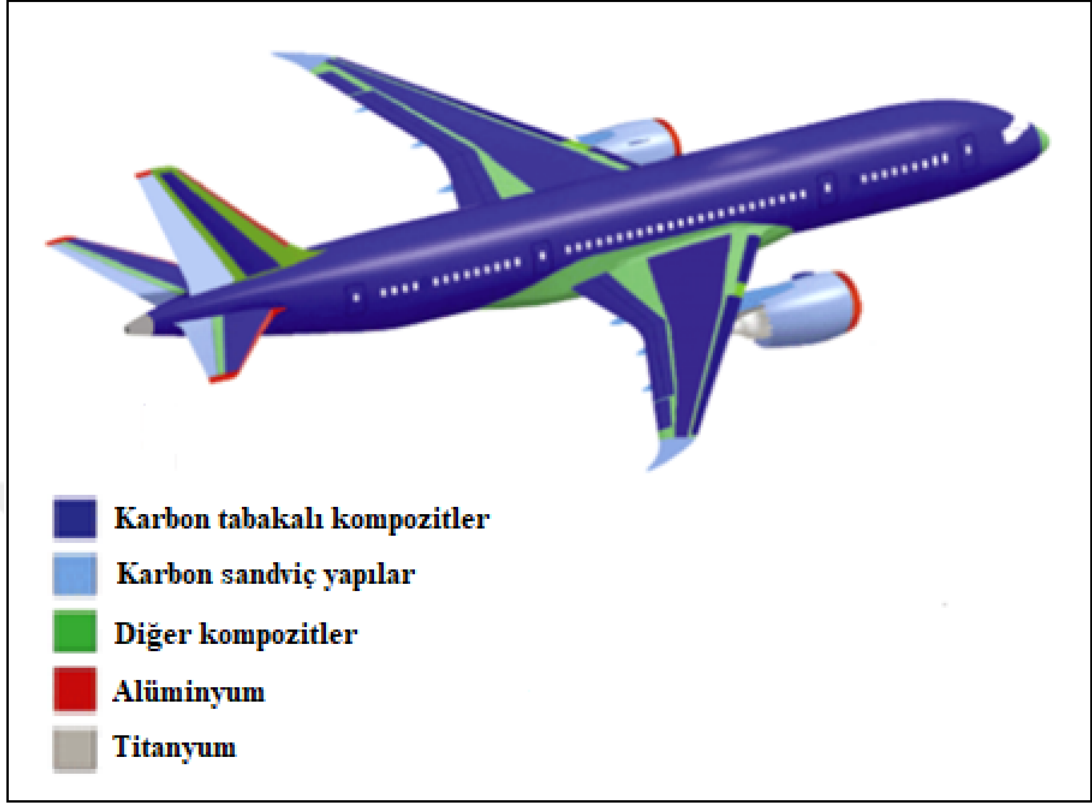
### **1.1.3. Ara yüzey**

Fiber ve matrisin temas halinde bulunduğu ara yüzey boyunca elde edilen mekanik ve kimyasal özellikler kompozitin malzeme özelliklerinin belirlenmesinde en az fiber ve matris malzemelerinin özellikleri kadar rol oynamaktadır. Rijitlik, modül, kırılma tokluğu gibi özellikleri birbirinden farklı iki malzemenin temas ettiği yüzey süreksizlik ve geçiş bölgesidir. Bu bölge çatlak oluşumu ve ilerlemesinde, malzemenin deformasyonunda orjin teşkil etmektedir.

## **1.2. Kompozit Malzemelerin Uygulamaları**

Yüksek mukavemet/ağırlık oranları, yüksek korozyon direnci ve düşük ısıl genişmesi nedeniyle karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler havacılık, otomotiv, denizcilik, medikal gibi birçok uygulamada kullanım için cazip hale gelmişlerdir. Havacılık alanında uçak motoru kanatları, gövde ve kanat yapımında kullanılmaktadır. Dış yapılardaki kullanımın yanı sıra uçak içerisindeki kabin ve diğer aksamların yapımında da bu malzemeler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Örneğin Airbus A350'de %30, Boeing B787'de %50 oranlarında karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozit tabakalar kullanılmıştır.

Şekil 1.3'te Boeing 787'deki kompozit malzeme kullanımı gösterilmektedir [22];



Şekil 1.3. Boeing 787'deki kompozit malzeme kullanımı [22]

Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin uzay araçlarında ve otomobillerde kullanılması ağırlığın azaltılmasını, dolayısıyla yakıt tüketiminin azalmasını ve verimliliğin artmasını sağlar. Aynı zamanda yapısal mukavemet ve gerekli yükün minimum ağırlıkta taşınması imkânını sağlar. Daha hızlı ve ağır uçakları durdurabilmek için yüksek performanslı frenler gerekmektedir. Normal veya kısa mesafeli duruş gerektiren koşullara uygun, yüksek sıcaklık ve termal şoka dirençli, düşük ısıl genleşmeye sahip, iyi ısıl iletken, yüksek sıcaklık stabilitesine sahip, mükemmel sürtünme ve aşınma direnci gösteren karbon takviyeli kompozitler kullanılarak yüksek fren gücü sağlanmaktadır. Kompozit malzemeler yüksek mukavemete, tokluğa, oksidasyon direncine, elektrik ve ısıl iletkenliğine sahip hafif malzemeler olduklarında dolayı uzay modüllerinde ve haberleşme uydularında kullanılmaktadır. Aynı zamanda termal zorlanmalar altında mikro çatlak dirençleri yüksektir. Uydu radyatöründeki ve güneş kollektöründeki termal zorlanmalarda kullanılan karbon fiber bazlı kompozitler çok daha yüksek ısıl iletkenliğine sahip olduklarından dolayı termal değişimleri kolayca başka yapılara transfer edip malzeme

hasarlarını önleyebilmektedirler. Elyaf takviyeli polimer esaslı malzemeden yapılmış tanklar dayanıklı zırha, yüksek dayanımlı gövdeye ve üstün hareket kabiliyetine sahiptirler. Ekonomik ve hafif olmalarından dolayı savaş esnasında metal gövdeli tanklara göre çok daha fazla sayıda nakliye edilebilmektedirler. Metalik gövdeye sahip olmadıklarından dolayı korozyona maruz kalmamaktadırlar. Balistik uygulamalarda cam ve yüksek modüllü fiberlerin termoset matris içerisinde kullanılması ile çelik ve alüminyumdan daha hafif, balistik korumada güvenilir malzemeler elde edilmektedir. Fiberlerden örülmüş üç boyutlu sistem içerisinde mermiden gelen darbe enerjisi çok sayıda dallanmış mikro çatlaklar ile sönmüştür. Tıbbi alanda biyo uyumlulukları sebebiyle implant malzemeleri olarak kullanılırlarken spor alanında tenis raketlerinde, kayak takımlarında, yelkenli teknelerde, bisikletlerde ve golf sopalarında kullanılmaktadırlar. Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin kullanımındaki artış bu malzemelerin işlenmesinde daha yüksek kalite elde etmek için işleme teknolojilerinin başarılı bir şekilde geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur.



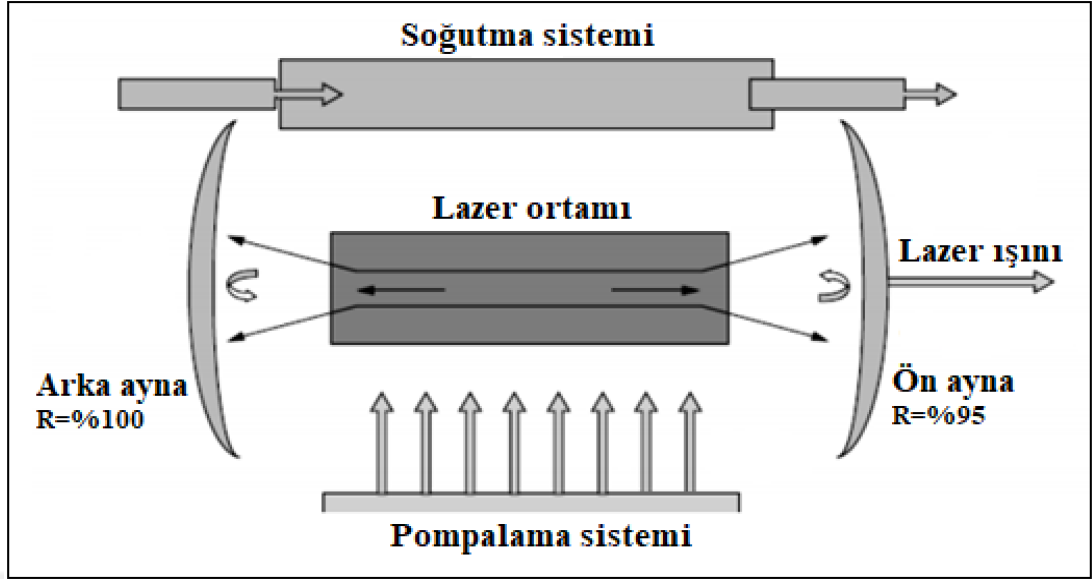
## **2. LAZER**

Lazerin çalışma alanlarındaki uygulanabilirliği ve kapasitesini anlayabilmek için operasyon mekanizmasını ve temel özelliklerini anlamak gerekir. Lazerin temelleri, malzeme ile etkileşimi ve endüstriyel uygulamalardaki işlemler bu bölümde ele alınmıştır.

### **2.1. Lazerin Temelleri**

Lazer tabiri ‘‘Uyarılmış Radyasyon Emisyonu tarafından Işık Amplifikasyonu’’ ifadesinden gelmektedir. Dünyadaki ilk lazer kullanımı 1960 yılında Maiman tarafından yakut kristal kullanılarak gerçekleştirildi [24]. Lazer, ultraviyolede kızılötesine kadar birçok dalga boyuna sahip, uyumlu, yakınsak ve monokromatik bir ışıdır [11]. Lazer ışınları bu özellikleri dolayısıyla normal ışıktan farklı olarak yönlüdür, yüksek güç yoğunluğuna daha iyi odaklanma yetilerine sahiptir ve kompozit malzemelerin işlenmesinde potansiyel olarak yararlı bir yöntem olabilmektedir [25].

Tipik bir lazer cihazı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi lazer ortamı, pompalama sistemi ve optik rezonatör olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Pompalama sistemi lazer ortamının atomlarını harekete geçirecek enerjiyi uygun bir biçimde sağlar. Uyarılmış atomların yüksek enerji seviyelerinden düşük enerji seviyelerine geçişi uyarılmış emisyon ile daha fazla emisyon uyaran fotonlar yayar. Yayılan radyasyon optik rezonatör tarafından hızla yükseltilir, yönlendirilir ve kontrol edilir. Radyasyonun bir kısmının paralel bir ışın olarak geçmesine izin verilirken geri kalan kısım lazer hareketini sürdürmek için boşluk içerisinde dolaşır. Çıkan radyasyon genellikle yüksek uzaysal ve zamansal tutarlılıklarla monokromatiktir [26].



Şekil 2.1. Lazer cihazının temel unsurları [26]

### 2.1.1. Lazer ışının özellikleri

Lazer ışınının malzeme işleme dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için kullanışlı olmasını sağlayan özel özellikleri vardır. Bu bölümde lazer ışınının en önemli özellikleri kısaca açıklanmaktadır.

#### 2.1.1.1. Monokromatiklik

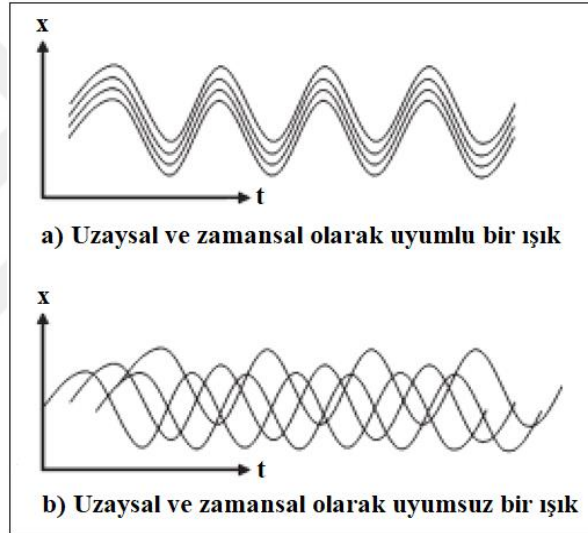
Monokromatiklik, lazer ışının çok küçük bir bölgeye odaklanmasını sağlayan önemli bir özelliktir. Diğer ışık kaynakları tarafından yayılan ışık çeşitli dalga boylarından oluşurken lazer ışını çok dar bir dalga boyu aralığı yayar. Lazer ışınının odaklanma özelliği malzemelerin yüzeylerinde yüksek seviyede lazer enerjisinin yoğunlaşmasını sağlayarak malzemelerin işlenmesini sağlar [11].

#### 2.1.1.2. Kolimasyon

Lazer radyasyonunun kolimasyonu ışının yönlü yapısı ile ilgilidir. Lazer ışınları, lazer kaynakları yönlendirilen eksene bağlı olarak tek yönde radyasyon yaydığı için tek yönlü olarak kabul edilir. Farklı yönlerde radyasyon yayan normal ışıktan farklı olarak büyük bir ışın sapması olmaksızın neredeyse aynı çapı koruyarak uzun mesafelere iletebilir. Böylelikle enerji yoğunluğunda çok fazla kayıp yaşanmadan iletebilir. Çok küçük bir odak noktası oluşturmak için bir mercekle odaklanılabilir ve yönlendirilebilir. Lazer ışının yönlülüğü genellikle ışın sapması olarak tanımlanır [27].

### 2.1.1.3. Uyumluluk

Uyumluluk, dalgaların düzenlilik derecesidir ve farklı t zamanlarında farklı iki noktadaki ışık dalgası arasındaki korelasyonun bir ölçüsüdür. Mutlak değeri sırasıyla uyumsuz kiriş ve uyumlu kirişe karşılık gelen 0 ile 1 arasındadır. Lazer ışınının uyumluluğu uzaysal ve zamansal olmak üzere iki bileşen olarak tanımlanır. Uzaysal uyumluluk zaman içerisinde tek bir anda uzaydaki farklı noktadaki aşamaları ilişkilendirirken, zamansal uyumluluk ise bir zaman dilimi boyunca uzayda tek bir noktadaki aşamaları ilişkilendirir. Şekil 2.2’de zamansal ve uzaysal uyumluluk kavramları görülmektedir. Lazer ışınının uyumluluğu özellikle interferometri ve holografi gibi uygulamalarda ilgi çekicidir [28-29].



Şekil 2.2. Lazer ışını uyumluluk dalgaları [11]

### 2.1.1.4. Parlaklık

Parlaklık, belirli bir açıda birim alan başına düşen lazer gücü miktarı olarak tanımlanır. Lazer ışınlarının  $10^{-6}$  steradyan değerlerinde çok küçük sapma açılarında yayılması, yüksek parlaklık değerlerinin elde edileceği çok küçük bir alana odaklanabilmesini sağlar. Bu değer malzeme işlemede önemli bir faktördür ve lazer ışınının enerji yoğunluğunu etkiler [28].

### 2.1.2. Endüstriyel lazer türleri

1960 yılında ilk yakut lazerin geliştirilmesinden bu yana lazerin etkisi birçok malzemede kanıtlanmıştır. Bununla birlikte ticari lazerler için aktif malzemelerin

aralığı ve çeşitliliği hala sınırlıdır. Lazerler kullanılan aktif ortamın fiziksel yapısına bağlı olarak genellikle katı hal lazerleri, gaz lazerleri, yarı iletken lazerler ve sıvı boya lazerleri olmak üzere dört ana türe ayrılır. Tablo 2.1’de her kategorideki önemli lazerlerin listesi verilmektedir [11]. Nd:YAG ve CO<sub>2</sub> lazerleri lazer işlemlerinden en sık kullanılan iki lazer türüdür.

Tablo 2.1. Endüstriyel lazer türleri [11]

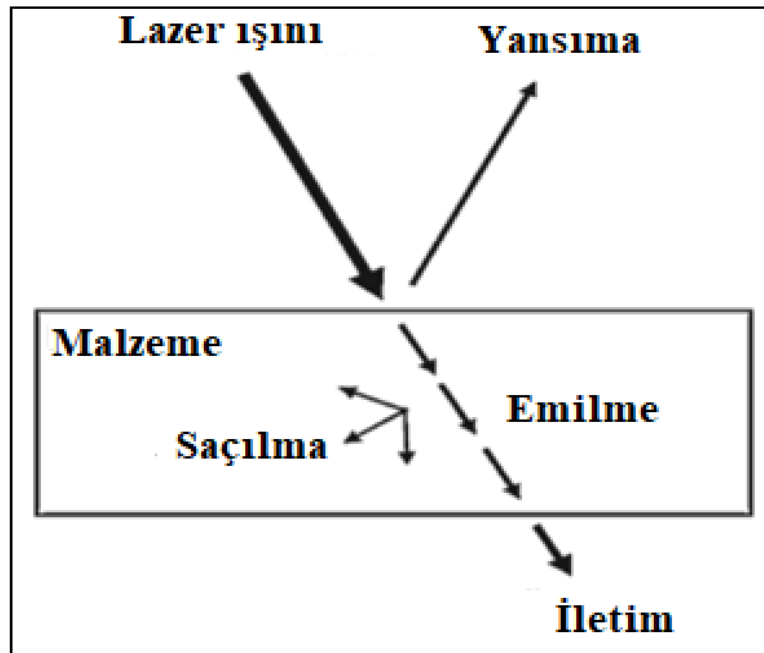
| <b>Lazer tipi</b>            | <b>Dalga boyu (nm)</b> |
|------------------------------|------------------------|
| <b>Katı hal lazerleri</b>    |                        |
| Nd:YAG                       | 1064                   |
| Yakut                        | 694                    |
| Nd:Glass                     | 1062                   |
| Aleksandrit                  | 700 - 820              |
| Ti-safir                     | 700 - 1100             |
| Er:YAG                       | 2940                   |
| Nd:YLG                       | 1047                   |
| <b>Gaz lazerleri</b>         |                        |
| HeNe                         | 632,8                  |
| Argon                        | 488 & 514,5            |
| Kripton                      | 520 - 676              |
| HeCd                         | 441,5 & 325            |
| CO <sub>2</sub>              | 10600                  |
| ArF                          | 191                    |
| KrF                          | 249                    |
| XeCl                         | 308                    |
| XeF                          | 351                    |
| Bakır buharı                 | 510,6 & 578,2          |
| Altın buharı                 | 628                    |
| <b>Yarı iletken lazerler</b> |                        |
| InGaAs                       | 980                    |
| AlGaInp                      | 630 - 680              |
| InGaAsP                      | 1150 - 1650            |
| AlGaAs                       | 780 - 880              |
| <b>Sıvı boya lazerleri</b>   |                        |
| Rodamin 6G                   | 570 - 640              |
| Kumarin 102                  | 460 - 515              |
| Stilben                      | 403 - 428              |

### 2.1.3. Lazer çalışma modları

Lazerler sürekli dalga ve darbeli ışın modlarında, mikro watt seviyelerinden milyon watt seviyelerine kadar değişen geniş bir güç değeri aralığında çalıştırılabilirler. Sürekli lazer ışını işlemlerinde sabit güç uzun bir süre serbest bırakılırken, darbeli lazer atımı işlemlerinde enerji yüksek tepe gücünde kısa süreli darbelerle hızla salınır. Malzemelerin lazerle işlenmesi sırasında kullanılan modun türü elde edilen kaliteyi büyük ölçüde etkiler. Yüksek sürekli dalga gücünün ürettiği büyük miktarda lazer ısı işleme kalitesini bozarken, darbeli modda üretim hızı düşmesine rağmen lazer gücü daha kaliteli işlemeyi sağlayarak oluşabilecek kusurları azaltır. Yüksek tepe gücü malzeme çıkarımını sağlar ve darbeler arasındaki süre bir miktar soğumaya izin verir. Darbe tekrarlama frekansı darbeli lazer işletim modunda işleme kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biridir [11].

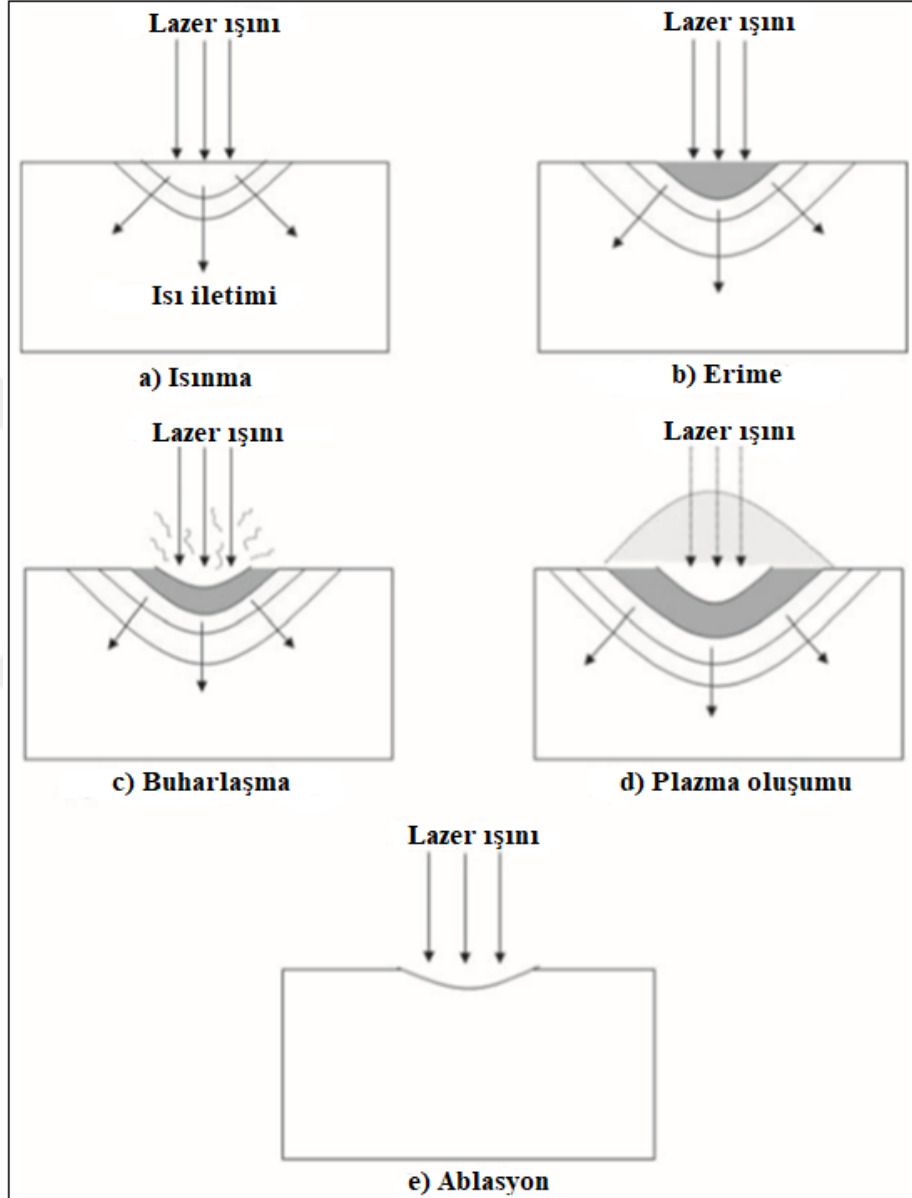
### 2.2. Lazer Malzeme Etkileşimi

Lazer işleminin yeteneklerini ve kısıtlamalarını anlamak için malzemelerin lazer ışını ile etkileşimleri sırasında meydana gelen fiziksel süreçlerin bilinmesi gerekmektedir. Lazer ışını malzeme yüzeyine gönderildiğinde etkileşim esnasında Şekil 2.3'te görüldüğü gibi yansıma, kırılma, emilme, saçılma, iletim gibi çeşitli fiziksel süreçler meydana gelebilir [11].



Şekil 2.3. Lazer ışınının malzeme ile fiziksel etkileşimi [11]

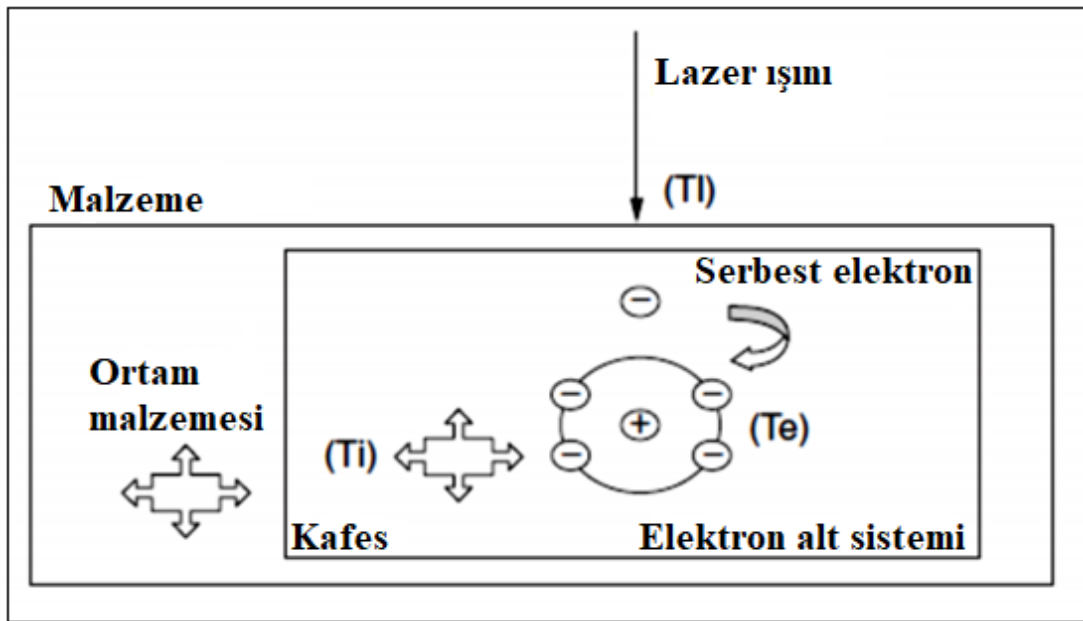
Malzemelerin lazerle işlenmesinde arzu edilen fiziksel olay emilimdir. Lazer ışınının absorpsiyonu sonucu malzemede Şekil 2.4'te görülen ısınma, erime, buharlaşma, plazma oluşumu ve ablasyon gibi lazer ile malzeme işlemenin temelini oluşturan termal etkiler meydana gelir [30].



Şekil 2.4. Lazer – malzeme etkileşimi sonucu oluşan termal etkiler [30]

Lazerin malzeme ile etkileşimi sonucu dalga boyu, enerji yoğunluğu gibi lazer ışınının karakteristiğine ve malzemenin emme kapasitesi, termal iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk gibi çeşitli termo-fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı mekanizmalarla malzeme çıkarılması meydana gelir [11].

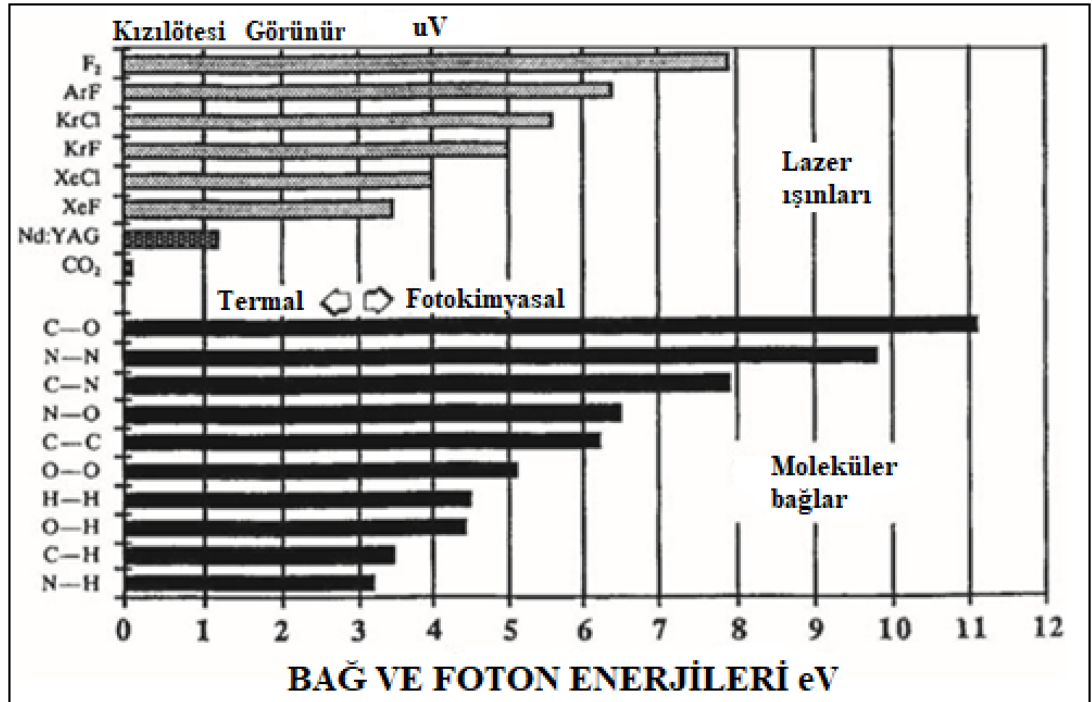
Lazer enerjisi Şekil 2.5'te gösterildiği gibi belirli bir gevşeme süresi ( $T_e$ ) içinde elektron alt sistemi aracılığıyla ortam malzemesine yayılır. Gevşeme süresi ( $T_e$ ), kafes ısınma süresinden ( $T_i$ ) daha azdır çünkü elektron ısınma kapasitesi kafes ısı kapasitesinden daha düşüktür. Milisaniye ve nanosaniye mertebelerindeki lazer darbe süreleri için ( $T_e < T_i < T_1$ ) elektronlar tarafından emilen lazer enerjisi kafese transfer için yeterli zamana sahiptir. Elektron ve kafes arasındaki termal denge sağlandıktan sonra ısı hedef katı malzemeye iletilir. Hedef malzemeye iletilen ısı yeterince yüksek olduğunda yüzeyin erimesine ve buharlaşmasına neden olur. Lazer yoğunluğu yeterince yükseldiğinde yüzey buharlaşması başlar ve buhar partikülleri yüzeyden çıkar. Oluşan buhar ile gelen lazer ışınlarının etkileşimi yüksek oranda plazma ile sonuçlanır. Plazma oluşumu lazer ışınlarının malzemeye ulaşmasını engeller. Femtosaniye lazerler gibi ultra kısa darbeli lazerler için darbe süresi ( $T_1$ ) elektron gevşeme süresinden ( $T_e$ ) daha kısadır ( $T_1 < T_e < T_i$ ). Elektronlar hızla ısıtılır ve yüksek lazer enerji yoğunluğu için, elektronlardan kafese aktarılan enerji hedef malzemeye iletilen ısı ile bağ yapısını kırmaya yeterlidir. Bu durumda doğrudan katı fazdan buhar faza geçiş meydana gelir ve ısıdan etkilenen bölgenin önemli ölçüde azalmasını sağlar. Pikosaniye lazerleri için lazer darbeleri geçiş durumundadır ( $T_1 < T_e < T_i$ ). Bir erime bölgesi oluşur ve alt tabakaya bir miktar ısı transferi gerçekleştirilir. Bununla birlikte pikosaniye remimindeki malzeme çıkarma mekanizması da katı fazdan buhar fazına geçiş biçimindedir [31].



Şekil 2.5. Lazer enerjisinin malzeme tarafından soğurulması [31]

### 2.2.1. Ablasyon

Foto-termal ve foto-kimyasal etkileşimlerle malzeme çıkarma işlemine ablasyon denir. Lazer ışınının malzeme tarafından soğurulması dalga boyuna, malzeme çıkarılması mekanizması ise foton enerjisine bağlıdır. Foto-kimyasal etkileşim termal olmayan bir etkileşim türüdür. Gönderilen fotonun enerjisi organik malzemelerdeki molekül zincirlerinde doğrudan bağ kırılmasına neden olur ve bu da önemli termal hasar olmadan moleküler parçalanma ile malzemenin çıkarılmasına neden olur. Bu ablasyon işlemi için foton enerjisinin bağ enerjisinden daha yüksek olması gerekmektedir fakat daha düşük olduğu durumlarda bir veya daha fazla fotonun eş zamanlı emilimi sonucu çoklu foton mekanizması ile ablasyonun meydana geldiği de gözlemlenmiştir. Bu durum UV ve daha büyük dalga boylarına sahip ışınlar için geçerlidir. Şekil 2.6'da yaygın olarak kullanılan lazer ışınlarının foton enerjileri ve bazı moleküler bağlarının ayrılma enerjileri gösterilmektedir. Çeşitli eksimer lazerlerin foton enerjileri birçok moleküler bağın ayrılma enerjisinden yüksektir ve bu da malzemelerin doğrudan bağ kopması yoluyla ablasyonu ile sonuçlanır. Nd:YAG ve CO<sub>2</sub> gibi büyük dalga boylarına sahip lazerin foton enerjileri moleküler bağların ayrılma enerjilerinden önemli ölçüde daha azdır [11].



Şekil 2.6. Bağ ve foton enerjileri [11]



Foto-termal etkileşimlerde emilen lazer enerjisi malzemede termal enerjiye dönüştürülür. Yüzeydeki sıcaklık artışı termal gerilmelere sebep olur ve malzeme çıkarılması gerçekleşir. Yüksek enerjili lazer ışını yüzeydeki kaynama noktasını aşar ve hızlı buharlaşmaya sebep olur. Termal gerilmeler ve yüzey buharlaştırma ile malzeme çıkarılması işlemlerine termal ablasyon denir [32]. Yalıtkan veya yarı iletken malzemelere gönderilen lazer ışını ilk olarak malzemenin atomlarında veya moleküllerinde titreşim meydana getirir. Ablasyon için gerekli olan ısı enerjisi bu titreşimler vasıtasıyla elde edilir ve malzemenin diğer bölümlerine iletilerek yüzeyde çukurlar oluşturulur.

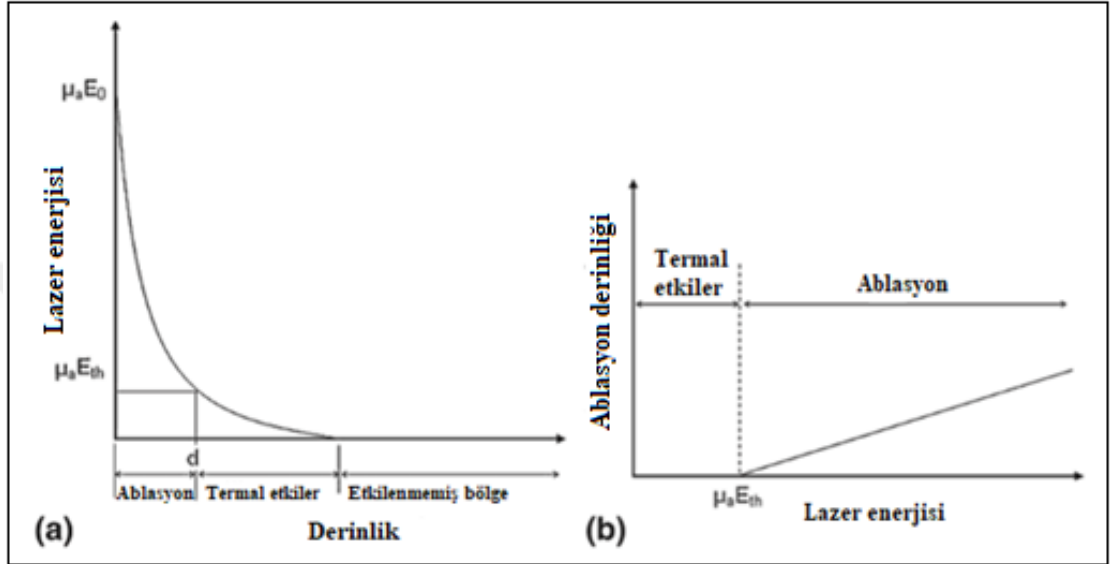
Lazer malzeme etkileşimlerinde ablasyon sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri lazer ışınının yayılması ile ilgili olan termal gevşeme süresidir, Denklem (2.1)'de tanımlanmıştır [33];

$$T_e = d^2 / 4\kappa \quad (2.1)$$

$\kappa$  ısı yayılım katsayısını,  $d$  ise emme derinliğini ifade etmektedir. Ablasyonu belirleyen iki önemli parametre emme katsayısı ve ısı yayılım katsayısıdır. Emme katsayısının büyük değeri ve ısı yayılım katsayısının küçük değeri malzeme için yüksek ablasyon verimliliği sağlar. Minimum seviyede termal hasar ile malzeme ablasyonu için lazer atım süresi termal gevşeme süresinden daha kısa olmalıdır. Böylelikle lazer enerjisi daha ince bir tabakaya hapsedilerek minimum termal yayılım ile emilecektir. Aksi halde, daha yüksek atım sürelerinde emilen enerji termal yayılım ile malzemeye dağılacaktır. Bu nedenle lazer malzeme etkileşimi sırasında malzemenin verimli bir şekilde ablasyonu için lazerin daha düşük atım süreleri ile çalışılması gerekir. Ultra kısa atım sürelerinde çok yüksek bir tepe yoğunluğu elde edilir ve termal difüzyon meydana gelmeden enerji gönderilir. Böylece erime, sıçrama, yeniden kristalleşme gibi termal bozulmalar olmadan yüksek verimlilikte ve hassasiyette işlemler gerçekleştirilebilir [34].

Ablasyon işlemi lazer enerjisi karakteristik eşik enerjisi değerini aştığında gerçekleşir. Ablasyon eşiği ablasyon yoluyla malzeme çıkarılması için gereken minimum enerjiyi temsil eder. Farklı malzemeler optik ve termal özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle farklı ablasyon eşik değerlerine sahiptirler.

Şekil 2.7’de  $E_0$  enerjisi ile gelen lazer ışınının malzeme tarafından emilimi gösterilmektedir. Ablasyon eşiği enerjisi ( $\mu_a E_{th}$ ) üzerindeki enerji değerlerinde ablasyon derinliği lazer enerjisi ile birlikte sürekli olarak artış göstermektedir. Ablasyon eşiği enerjisi ( $\mu_a E_{th}$ ) altındaki enerji değerlerinde ise istenmeyen termal etkiler meydana gelir [11].



Şekil 2.7. Lazer ablasyonu eşik enerjisi a) Emilen lazer yoğunluğunun malzeme derinliğinde dağılımı b) Ablasyon derinliğinin lazer enerjisi ile değişimi [11]

Malzeme özellikleri ve gelen lazer ışınının parametreleri absorbe edilen enerjinin ablasyon eşiğine ulaştığı yeri belirler böylece ablasyon derinliği belirlenir. Ablasyon derinliği Denklem (2.2)’ye göre hesaplanmaktadır [12];

$$D = 1/\mu_a \cdot \ln(E_0/E_{th}) \quad (2.2)$$

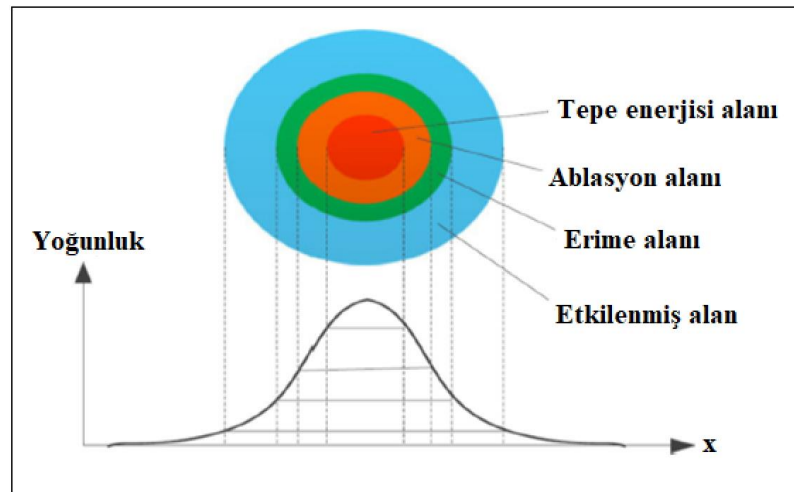
D bir lazer atımı ile elde edilen ablasyon derinliğini,  $\mu_a$  emilim katsayısını,  $E_0$  yoğunluğu,  $E_{th}$  ise eşik yoğunluğunu temsil etmektedir.

Lazer mikro işlemede ablasyon oranı bir lazer atımı ile elde edilen derinliktir ve öncelikle dalga boyu, enerji yoğunluğu, atım süresi, darbe tekrarlama frekansı gibi lazer parametrelerine ve malzemenin termo-fiziksel özelliklerine bağlıdır. Malzemenin ablasyonu yüzeyde çukurların oluşmasına neden olur [11].

Tüm dalga boylarında ablasyonun görülmediği bir lazer enerjisi yoğunluğu vardır. Ablasyon oranı, lazer enerjisi eşik değerini aştıktan sonra lazer yoğunluğu ile birlikte

artış göstermektedir. Ablasyon eşiği düşük dalga boylarında daha belirgindir. Lazer ışınının dalga boyu arttıkça ablasyonun başladığı eşik yoğunluğu da artmaktadır. Lazer enerji yoğunluğunun eşik değeri atım süresindeki artışla birlikte azalmaktadır. Malzemelerin ablasyon oranı aynı zamanda lazerin atım sayısı ile de ilişkilidir. Sabit lazer yoğunluğunda, atım sayısı arttıkça ablasyon oranı doğrusal olarak artmaktadır. Doğrusal ilişkinin eğimi lazer enerjisinin yoğunluğuna ve darbe tekrarlama frekansına bağlı olarak değişmektedir. Daha yüksek tekrarlama frekansı değerlerinde genellikle daha yüksek ablasyon oranı elde sağlanır. Ablasyon derinliğinin atım sayısı ile arasındaki ilişkide genellikle yüksek atım sayılarında doğrusallıktan sapma yaşanıp ablasyon oranının azaldığı gözlemlenmektedir. Yüksek atım sayılarında gözlemlenen bu ablasyon oranındaki azalışının nedeni malzemenin ablasyona uğramış kısmının istenen şekilde uzaklaştırılmayarak yeniden katılaşması sonucu, gelen lazer ışını absorbe etmesi ya da yansıtmasıdır. Bu etkiler ablasyon derinliği arttıkça belirginleşir [35-38].

Malzemelerin darbeli lazer ile ablasyonu sırasında, Şekil 2.8’de görüldüğü üzere, Gauss enerji dağılımına uygun olarak, lazer odağının merkez bölgesinde krater oluşumu ile buharlaşma meydana geldiği, bunun yanı sıra kenar bölgelerde erime ve katılaşma ile yeniden katılaşmış katman görülmektedir. Lazer ablasyonuna bağlı olarak yüzey morfolojisi açık bir şekilde etkilenmiş alan, erime alanı ve ablasyon alanı olarak ayırt edilebilmektedir. En yüksek enerji genellikle ablasyon alanında yoğunlaşır ve malzemenin buharlaşmasını sağlar. Böylelikle küçük çaplı delikler lazer ışını kullanılarak elde edilebilir [39].



Şekil 2.8. Ablasyon rejimi şeması [39]

### 2.3. Lazer İşlemleri

Üretim sonrası ürünlerin çoğu tamamen bitirilmiş ürünlere dönüştürülmek için ikincil işlemlere tabi tutulmaktadır. En önemli ikincil süreçlerden biri de malzeme işlenmesidir. İşleme, malzemenin tasarım şartnamesine uygun boyut ve toleranslarda istenilen şekle dönüştürülmesi için iş parçası çıkarılmasıdır. Malzeme işlenmesi bitmiş ürüne değer kattığından malzeme çıkarma süreçleri prosesin genel ekonomisini kontrol etmek için büyük önem kazanmıştır. Farklı malzemelerin işlenmesi için farklı başarı düzeylerinde çok sayıda işleme yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bir işleme yöntemi bir malzeme için maliyet ve kalite açısından son derece uygun olabilirken diğeri için kabul edilemeyecek düzeyde olabilir. Geleneksel işleme yöntemlerinde kesici takım tarafından kesme deformasyonu ile malzemenin mukavemetini aşan mekanik gerilmelerin meydana getirilmesi ile malzeme çıkarılır. Endüstriyel uygulamalarda tornalama, frezeleme, abrasif işleme gibi çeşitli malzeme kaldırma işlemleri kullanılmaktadır. Geleneksel işleme yöntemleri havacılık, otomotiv, enerji endüstrisi gibi hızla gelişen teknolojinin olduğu ileri alanlarda kullanılan titanyum, kompozitler, seramik gibi işlenmesi zor, sert, yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklıkta ve performansta çalışan malzemelerin işlenmesinde istenen kalite düzeyini ve ekonomik şartları sağlayamadığından dolayı malzeme işlenmesi için özel yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel olmayan işleme yöntemleri genellikle ortak enerji formlarını yeni şekillerde uygulayan işlemler olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan enerji formuna göre mekanik, elektriksel, termal ve kimyasal olmak üzere sınıflandırılır. Geleneksel olmayan mekanik işleme yöntemlerinin çoğunda malzemenin çıkarılması yüksek hızlı akışa sahip su jeti veya aşındırıcı taneler tarafından malzemede meydana gelen abrazif aşınma ile gerçekleşmektedir. Bu yöntemin kullanımı özellikle düşük elektrik iletkenliğine ve termal duyarlılığa sahip malzemelerin işlenmesinde uygundur. Geleneksel olmayan elektriksel işleme yöntemlerinde malzemenin çıkarılması elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle oluşan elektrolit etki yoluyla gerçekleştirilir. Bu yöntem sadece özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Geleneksel olmayan kimyasal işleme yöntemlerinde malzemenin çıkarılması yüzeye etki eden kuvvet olmadan kimyasal etki ile gerçekleşir. İş parçasının tüm yüzeyinden düzgün bir şekilde malzeme çıkarımı için veya belirli yüzey alanlarını inceltmek için kullanılan kontrollü bir yöntemdir.

Geleneksel olmayan termal işleme yöntemlerinde yüksek enerji kaynağı malzemenin küçük bir alanına yoğunlaştırılır ve lokal olarak malzeme çıkarımı gerçekleştirilir. Enerji kaynağı olarak elektronlar ve fotonlar kullanılır. Malzeme çıkarma oranı malzemenin sertliğinden ve mukavemetinden bağımsızdır bu nedenle genellikle son derece sert ve işlenmesi zor malzemelerin işlenmesinde kullanılır [11].

Lazer ışını ile malzeme işlenmesi termal bir yöntemdir. Lazer ablasyonu, endüstride malzeme işlenmesinde ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzeme işlenmede mikro işleme, kanal açma, kesme, delme, yüzey dokusu oluşturma gibi işlemlerde kullanılırken tıbbi uygulamalarda ise dokuların hassas ablasyonunda kullanılmaktadır. Lazer ışını iş parçasının hareketi ve geometrisi kontrol edilerek tek, iki veya üç eksenli olarak malzeme işlenmesi uygulamalarında kullanılmaktadır. Lazer ile işleme yüksek üretim oranlarının istendiği birçok endüstriyel uygulamalarda verimli ve ekonomiktir. Lazer ile malzeme işlenmesinde bazı sınırlamalar da mevcuttur. Geometrik ve metalürjik kusurların minimum düzeyde olması için operasyon parametrelerin seçimi oldukça önemlidir. Doğru kullanım ile bu hatalar tamamen ortadan kaldırılabilir ve kalitesi yüksek yüzeyler elde edilebilir.

### **2.3.1. Yüzey dokusu**

Gelişmiş düzeydeki mühendislik malzemelerindeki artış, hassas tasarım gereksinimlerine, alışılmadık boyutlarda ve zor şekillerde iş parçası ihtiyaçlarına yol açmıştır. Bir malzemenin sürtünme ve aşınma gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek için bazı işlemlerin yapılması gereklidir. Bu tür gereksinimlerin karşılanması geleneksel işleme yöntemlerinin kullanımıyla pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle geleneksel olmayan, gelişmiş işleme süreçlerinin gelişimi gerçekleşmiştir. Günümüzde endüstriler elektrokimyasal işleme, kimyasal işleme prosesleri, ultrasonik işleme, jet işleme prosesleri, elektro deşarjlı işleme ve ışın işleme prosesleri gibi çeşitli gelişmiş işleme teknikleri kullanılmaktadır. Fakat her bir işleme sürecinin iş parçası malzemesi ve şekilleri gibi unsurlarla ilgili kendilerine özgü sınırlamaları vardır. Lazer ışını ile malzeme işleme de bu gelişmiş işleme tekniklerinden biridir [40].

Yüzey özellikleri kompozit malzemeler için oldukça önemlidir. Yüzey modifikasyonları kompozitlerin tribolojik özelliklerini geliştirmektedir. Sürtünme ve aşınma davranışları yüzey pürüzlülüğü ile alakalıdır. Sürtünmeyi azaltmak için yüzey

kalitesini iyileştirmek en makul yöntemlerden bir tanesidir. Yüzey dokusu malzemelerin tribolojik performansını iyileştirmek için kullanılan yüzey modifikasyon yöntemlerinden biridir. Mikro ve nano ölçekli çukurlar mekanik sistemlerde etkileşen yüzeylerin tribolojik özelliklerini iyileştirmede önemli bir yüzey dokusu olarak kabul edilmektedir. Malzemenin yüzeyinde istenilen geometriye sahip çukurların oluşturulması ile uygulanır. Çukurlar tribolojik etkileşimde olan malzemelerin yüzey morfolojilerini değiştirmektedir. Çeşitli mühendislik alanları yağlamayı, aşınma direncini ve korozyon direncini artırma gibi amaçlar için mikro ölçekli çukurlar kullanılır. Özellikle yağlanmış yüzeylerde sürtünmeyi ve aşınmayı azaltarak malzemelerin ömürlerinin uzamasına yardımcı olur [13].

Lazer ablasyonu ile yüzey dokusu oluşturma yüzey modifikasyon yöntemlerinden biridir. Lazer yüzey tekstürü mekanik parçalar üzerinde çeşitli desenler oluşturarak malzemelerin sürtünme ve aşınma performanslarını iyileştirdiğinden dolayı özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok tribolojik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [41]. Tribolojik etkileşimlerde çukurların faydalı etkisi sürtünme katsayısını düşürmesinin ve aşınma performansını artırmasının yanı sıra yetersiz yağlama şartları altında aşınma artıklarını yakalayıp hapsedmek için yağ haznesi görevi görmesidir [42]. Yüzey dokusunda çukurların geometrik özellikleri sürtünme davranışını etkilemektedir. Yüzey dokusu modifikasyonlarında çukur oluşturma yanı sıra daire, kare, üçgen, düz oluk, çapraz oluk gibi farklı geometriler de mevcuttur. Yüzey dokusu sadece tribolojik özellikleri geliştirmede değil aynı zamanda mekanik, elektrik ve optik özellikleri geliştirmede de kullanılır [43-44]. Yüzey dokusu oluşturmada kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, sürdürülebilirlik, düşük maliyet sebebiyle endüstride lazer kullanımı tercih edilmektedir.

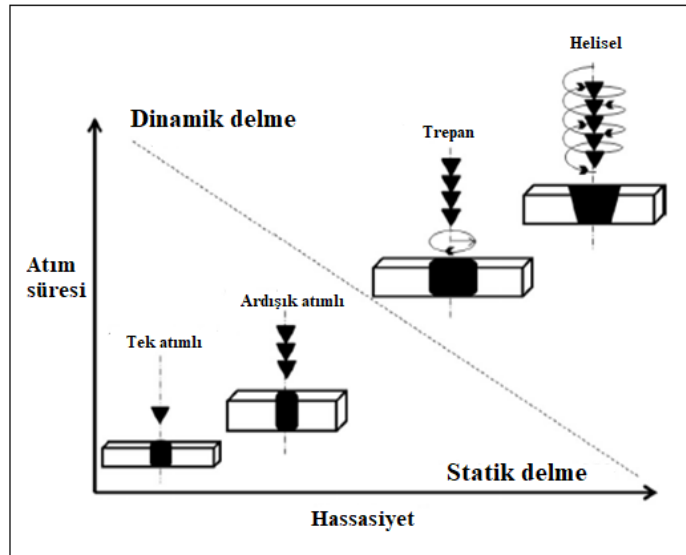
Lazer ile tekstür edilmiş yüzeylerin sürtünme katsayısı pürüzsüz yüzeylere kıyasla daha düşüktür [45]. Abrasif jet ile işleme yöntemiyle üretilen çukurlarda küresel bir morfoloji gözlenirken lazer ışını ile işleme yöntemiyle oluşan çukurlarda ise daha çok açısız bir morfoloji gözlemlenmektedir. Tribolojik özelliklerin büyük ölçüde mikro çukurların boyutuna ve yoğunluğuna bağlı olduğu fakat oyuk şeklinin yuvarlak veya açısız olmasının sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkilemediği bulunmuştur [46].

Yüzey tekstüre etme bir malzemenin yüzey özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüzey işleme için en tercih edilen yöntem lazer yüzey işlemedir ve genellikle Nd:YAG tipi tercih edilmektedir. Yüzey dokusu oluşturma üzerine yapılan çalışmalarda mikro mertebesindeki çukurların sürtünme katsayısını azalttığı ve aşınma performansını arttırdığı görülmüştür. Yüzeydeki çukur yoğunluğundaki artış aşınma ömrünü iyileştirmektedir [13].

### 2.3.2. Delik delme

Lazer ile delik delme geleneksel mekanik delik delme işlemlerinin uygulanamadığı veya düşük verimli, kalitesiz ve maliyetli olduğu alanlarda kullanılmaktadır. Polimerler, seramikler, kompozitler gibi çeşitli malzemelerin yüksek derinlik/çap oranı istenen mikro delik delme uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir. Ayrıca çeşitli yöntemlerle geometrik olarak geniş delikler de açılabilir. Ayrıca çeşitli yöntemlerle geometrik olarak geniş delikler de açılabilir.

Lazer ile delik delmenin lazer ışınının ve CNC tezgahının bağlı hareketine göre statik ve dinamik olmak üzere iki farklı tipi vardır. Şekil 2.9’da lazer ile delik delmenin sınıflandırılması gösterilmektedir [9];



Şekil 2.9. Lazer ışını ile delik delme teknikleri [9]

Statik delme tekniğinde hem iş parçası hem de lazer ışını sabit bir durumdadır ve malzeme aynı noktaya bir dizi atış etkisiyle çıkarılır. Delik delme işlemi tek bir lazer atışı ile tamamlanırsa tek atımlı delme, birden fazla atım ile tamamlanırsa ardışık atımlı delme olarak adlandırılır. Atış sayısı malzeme özelliklerine ve iş parçası

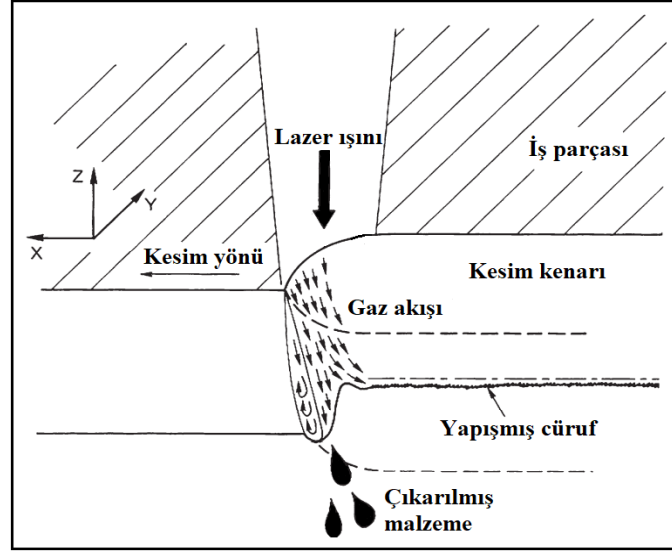
kalınlığına bağılı olarak değişir. Ardışık atışlarla delik delinmesinde art arda atışlarla karbon fiberler kolayca çıkarılır fakat atım araları yetersiz soğuma suresi sebebiyle lifler boyunca hızlı bir şekilde iletilen ısı polimer matriste bozunmalara sebep olur. Matriste genişletilmiş bir termal hasar meydana gelir ve fiberlerin çapında şişme gozlenir [1, 4, 47].

Dinamik delik delme tekniğinde lazer ışını önce deliğin ortasını deler daha sonra deliğin çevresine hareket eder. Trepan delme bu kategoride kullanılan en yaygın tekniklerden biridir. Helisel delme 0 - 5° arası eğim ile gerçekleştirilir ve delme hassasiyeti diğer delme tekniklerine gore daha yüksektir. Statik tekniklerle delinmiş deliğin kalitesi dinamik delme işlemlerine kıyasla o kadar iyi değildir. Dinamik tekniğin temel avantajı aynı çaptaki deliği delmek için statik yönteme gore daha az lazer enerjisine ihtiyaç duyulmasıdır. Çünkü ıkarılacak dairesel hacim silindirik hacimden daha küçüktür. İş parçasına daha az seviyede lazer enerjisi girişi sonucu daha küçük bir ısıdan etkilen bölge oluşur ve bu her zaman bir avantajdır [9].

### **2.3.3. Kesme**

Lazer ile kesme metal, seramik, kompozitler gibi gelişmiş malzemeler başta olmak üzere mühendislik malzemelerinde karmaşık geometriler üretmek için yaygın olarak kullanılan termal bir işlemdir. Küçük veya ince bileşenler mekanik kuvvetler olmadan kesilebilir. İşlem verimliliği malzemenin mekanik özelliklerinden ziyade termal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. İş parçasına odaklanmış bir lazer ışını gönderildiğinde üretilen ısıнын bir kısmı malzeme yüzeyi tarafından emilir ve iş parçasına aktarılır. Enerji yoğunluğuna bağlı olarak emilen enerji işleme bölgesinin bir kısmını erimiş hale dönüştürür, buharlaştırır ve kalınlık boyunca belirli bir derinliğe sahip dar bir çentik genişliği yaratarak malzemeyi kimyasal olarak bozar. Gaz basıncı yardımıyla çıkarılan malzeme hacmi kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Lazer ile malzeme kesim prosesinin şeması şekil 2.10'da gösterilmektedir [48-49].





Şekil 2.10. Lazer ile malzeme kesim prosesi [49]

Lazer ışınının iş parçası ile etkileşimine ve malzeme çıkarımı işlemi sırasında kullanılan yardımcı gaz rollerine bağlı olarak füzyon kesim, reaktif gaz füzyon kesim, buharlaşma kesim ve kimyasal bozunma kesim olmak üzere dört farklı lazer ile malzeme kesim tekniği vardır. Optimum kesme tekniğinin seçimi malzemenin termofiziksel özelliklerine, iş parçasının kalınlığına ve kullanılan lazer tipine bağlıdır.

Lazer füzyon kesim işleminde malzemenin lazer ısı enerjisi kullanılarak eritilmesi ile gerçekleştirilir. Erimiş malzeme daha sonra yüksek basınçlı inert gaz kullanılarak işlenmiş çentikten çıkarılır. Gaz ayrıca kesim bölgesini ve lazer optiğini korur. Bu işlem tüm metaller, termoplastik esaslı polimerler ve bazı seramikler için kullanılmaktadır. İşlem sonucunda kesim yüzeyindeki çizgiler ve alt kesim kenarında cüruf oluşumu başlıca dezavantajlarındandır. Lazer reaktif gaz ile füzyon kesim işlemi sırasında yardımcı gaz olarak inert gazlar yerine oksijen gibi reaktif bir gaz veya oksijen içeren bir karışım kullanılır. Oksijen gazı erimiş malzemeyi çıkarmanın yanı sıra erimiş malzemeyle reaksiyona girerek kesim bölgesine ek ısı girdisi sağlar ve kesim işlemi geliştirmiş olur. Lazer buharlaştırma ile kesim işlemi malzemenin yüksek yoğunluklu, odaklanmış bir lazer ışınıyla buharlaşma sıcaklığına ısıtılması ile gerçekleştirilir. Genellikle darbeli lazerler kullanılarak kısa atım sürelerinde yüksek tepe gücü eldesi ile malzemenin büyük bir kısmı buharlaştırılır ve yardımcı gaz vasıtasıyla uzaklaştırılır. İşlem sırasında daha az eritmenin olması kesim kenarlarının eşit seviyede olmasını sağlar. Bazı polimerler ve kompozitleri bu yöntem ile kesilebilmektedir. Lazer kimyasal bozunma ile kesim işlemi çok az ısı oluşması

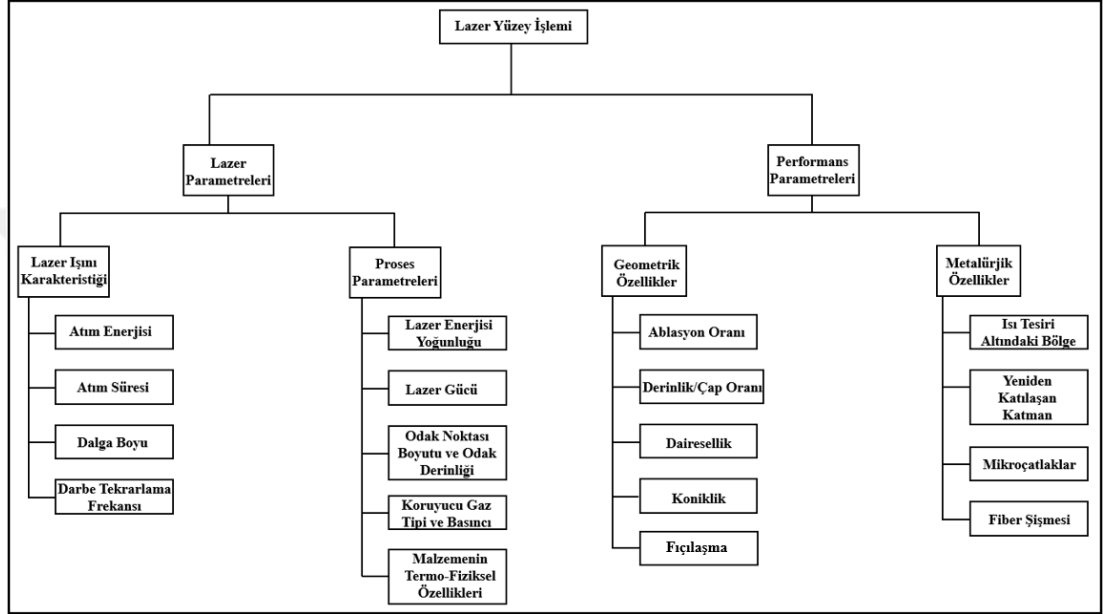
nedeniyle soğuk kesme işlemi olarak bilinir. Lazer ışını enerjisi ile kimyasal bağlar kırılarak malzeme bozulması gerçekleştirilir. Bu işlem en çok termoset esaslı polimerlerin ve ahşabın işlenmesinde kullanılır. Daha yüksek kesim kalitesine rağmen kesim oranı diğer yöntemlere nazaran daha düşüktür [11].

#### **2.4. Lazer Parametreleri**

Çeşitli imalat işlemlerinin belirli bir malzemeye uygunluğu malzemenin erime noktası, mukavemet, süneklik, deformasyon direnci gibi malzeme özellikleri ile belirlenirken lazer temelli işlemlerin uygunluğu öncelikle malzemenin lazer ışını absorbe edebilme özelliği ile belirlenmektedir. Kompozit malzemelerin bileşen fazlarının farklı özelliklerde olması nedeniyle lazer ile işlenmelerinde birtakım zorluklar ortaya çıkmaktadır. Lazer işleminin kalitesi malzemenin geometrik ve metalürjik özellikleri ile ilgilidir. Her işlemin kendisine has bazı kalite kusurları bulunmaktadır. Bu kusurların bazıları parçaların işlevsel performansını bozacak kadar kritik değilken bazı durumlarda bu kusurlar performansı önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin yüzey kusurları parçaların yorulma dayanımını etkilemektedir. Yüzey kalitesi işlem sonrası malzemenin yüzeylerinin geometrik düzensizlikleri ile ilgilidir ve faz dönüşümleri, artık gerilmeler, gerçekleşen reaksiyonlar gibi etkenlerden olumsuz etkilenmektedir. Geleneksel olmayan işleme yöntemleri ile genellikle geleneksel işleme yöntemlerine göre daha iyi yüzey kalitesi elde edilir ve işlem parametreleri kontrol edilerek yüzey kalitesi iyileştirilebilir. İşlem sırasında ısı üretimi yüzey kalitesini etkileyebilmektedir. Polimerlerin işlenmesi sırasında iş parçasının sıcaklığı cam geçiş sıcaklığının üzerine çıkarsa malzemenin sünek şekilde çıkarılması sebebiyle iyi bir yüzey kalitesi elde edilebilir aksi halde gevrek kırılma sonucu pürüzlü yüzeyler meydana gelebilir. Birçok durumda belirli bir uygulama için işlem türünün nihai seçiminde ekonomik hususlar da son derece önem arz etmektedir. Lazer ile malzemelerin işlenmesi yalnızca teknik yetenekler açısından değil aynı zamanda ekonomik hususlar açısından da önemli avantajlar sunmaktadır [11].

Modern Nd:YAG lazerleri her bir lazer darbesinin geçici güç profilini şekillendirme yeteneğine sahiptir. Sağladığı bu esneklik daha önce mevcut olmayan bir hassasiyetle termal girişin ve ısı dağılımının kontrolünü sağlar. Bu sayede lazer ışının malzemedeki penetrasyonu, eriyen bölgenin büyüklüğü ve delik oluşumu kontrol edilebilir.

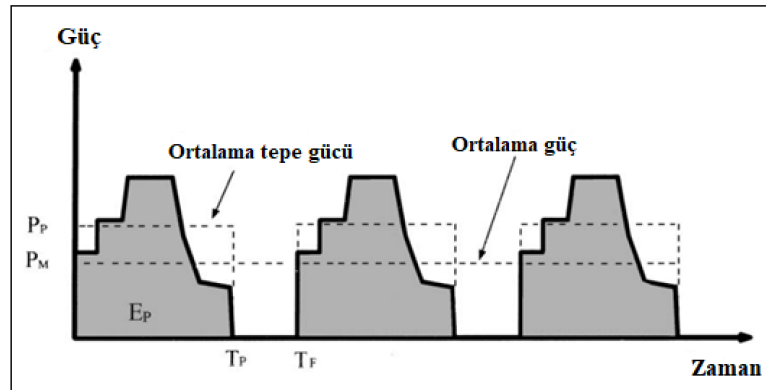
Nd:YAG lazer yüksek enerji verimine, yüksek tepe gücüne ve esnek bir lazer ışını yollama sistemine sahiptir. Darbeli lazer sistemi, çeşitli deneysel koşulların uygulanabileceği ve malzemelerin lazer ile işlenmesi performansı üzerinde çeşitli düzeylerde etkileri olan çok sayıda işlem parametresine sahip olmasıyla karakterize edilir. Lazer işlemindeki önemli işlem ve performans parametreleri Şekil 2.11'deki diyagramda gruplanmıştır [9, 50].



Şekil 2.11. Lazer işlemin parametreleri

#### 2.4.1. Lazer ışımı karakteristiği

Bir seri sabit enerjili lazer atımı için lazer çıkış gücünün şeması Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Diyagramda ortalama tepe gücü, ortalama güç, atım süresi ve atım frekansı gösterilmektedir [50].



Şekil 2.12. Lazer atımının şeması [50]

Ortalama lazer gücü, ortalama lazer tepe gücü ve darbe tekrarlama frekansı Denklem (2.3) – (2.5) arasında verilmiştir [50];

$$\text{PRR: Darbe tekrarlama frekansı (Hz)} = 1 / T_F \quad (2.3)$$

$$P_M: \text{Ortalama lazer gücü (kW)} = E_P \times \text{PRR} \quad (2.4)$$

$$P_P: \text{Ortalama lazer tepe gücü (kW)} = E_P / T_P \quad (2.5)$$

$E_P$  atım enerjisini,  $T_P$  atım süresini,  $T_F$  ise iki atım arasındaki zamanı temsil etmektedir. Dalga boyu ( $\lambda$ ), bir dalga örüntüsünün tekrarlanan birimleri arasındaki mesafedir. Lazer enerjisinin malzeme tarafından emilimi lazerin dalga boyuna bağlı olarak değişir. Daha kısa dalga boylarında yüksek foton enerjisi nedeniyle malzemeler tarafından daha fazla emilir. Aynı zamanda daha kısa dalga boylarında daha küçük odak noktası alanı elde edilir. Lazerler ışık dalga boylarına göre kızılötesi, görünür ve ultraviyole olarak sınıflandırılabilir.

## **2.4.2. Proses parametreleri**

### **2.4.2.1. Lazer gücü ve enerji yoğunluğu**

Lazer gücü saniyedeki enerji olarak tanımlanırken, lazer enerjisinin yoğunluğu odaklanan alan başına düşen enerjidir ( $J/cm^2$ ). Enerji yoğunluğu parametrelerinin etkisinin tek bir terimde ifade edilebilmesini mümkün kıldığından birçok lazer işleminin analizinde geniş kabul görmektedir. Malzemelerin lazer ile işlenmesi için lazer ışınının küçük bir odak noktası boyutuna odaklanarak elde edilebilecek en yüksek enerji yoğunluğu gereklidir. Darbeli lazerlerde tepe gücü çok önemli bir rol oynarken sürekli lazerlerde ortalama güç makro işleme uygulamaları için önemlidir [51].

### **2.4.2.2. Odak noktası boyutu ve odak derinliği**

Odak noktası boyutu malzeme işlemede birincil öneme sahip olan ışımaya belirler. Lazer işleme sırasındaki erime, buharlaşma gibi baskın malzeme çıkarma mekanizması ve bunun sonucunda oluşan malzeme çıkarma oranı doğrudan yüzeydeki ışımaya bağlıdır. Maksimum ışınım minimum odak çapına karşılık gelir. Bununla

birlikte lazer ışını sonsuz küçük bir noktaya odaklamak mümkün değildir. Her zaman ışınların kırılım sınırı tarafından belirlenen minimum bir nokta boyutu vardır [11].

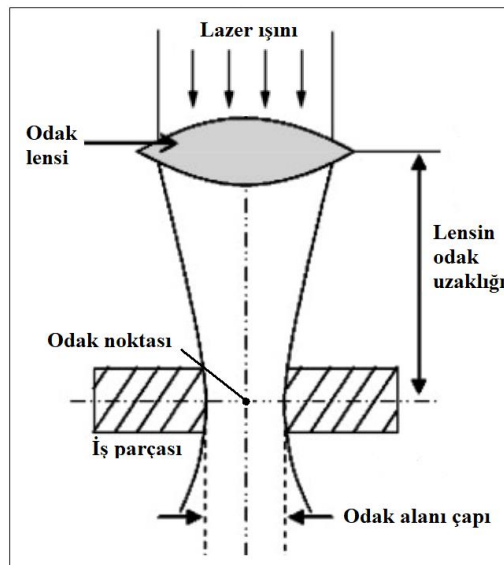
Odak derinliği ve odak noktası boyutu, lens odak uzunluğu ve ışın çapı ile ilişkilidir. Daha küçük odak uzunluklu lensler kullanılarak küçük bir nokta elde edilebilir ancak çıkarılan ve sıçrayan malzemenin lense hasar vermesini önlemek için daha fazla özen gösterilmesi gerekmektedir. Lazer ışınının enerjisi malzeme işleme işlemlerinde enerji yoğunluğunu arttırmak için küçük bir alana odaklanmalıdır [52].

Işık kırılımıyla sınırlı odak noktası boyutu optik prensipler tarafından belirlenir. Odaklanma optiğinin performansı, lens sapmalarıyla düşebilir. Genel olarak en iyi odaklama koşulları öncelikle Gauss ışın profili ile minimum saplamara sahip lensler kullanılarak elde edilir Bir Gauss lazer ışını için kırınım sınırlı minimum nokta yarıçapı yaklaşık olarak Denklem (2.6)'ya göre verilir [11];

$$r_s = \lambda F \quad (2.6)$$

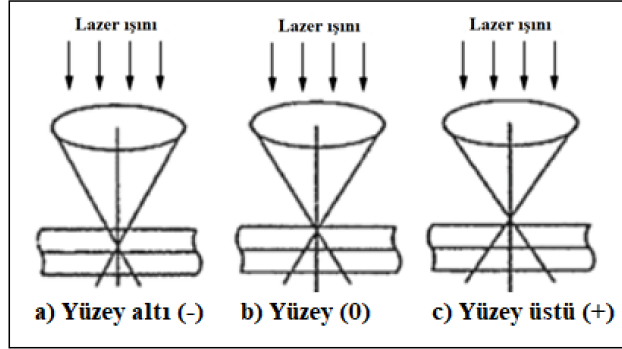
F lens sayısını,  $r_s$  minimum odak noktası yarıçapını temsil etmektedir. Birden daha az sayıda F sayılarıyla çalışmak pratik olmadığından minimum odak noktası yarıçapı yaklaşık olarak lazer ışınının dalga boyuna eşit kabul edilir.

Gelen lazer ışını Şekil 2.13'te gösterildiği gibi minimum kesit alana yakınsanır. Odak alanı çapı odak derinliği boyunca değişiklik göstermektedir [40].



Şekil 2.13. Lazer ışını profili [40]

Lazer ile malzeme işlenmesi sırasında odak alanının numune üzerinde dikey eksen doğrultusunda yerleştirileceği yerin konumu Şekil 2.14'te görüldüğü üzere yüzey altı, yüzey ve yüzey üstü olarak üç şekilde sınıflandırılabilir;



Şekil 2.14. Odak alanı derinliği [26]

### 2.4.3. Geometrik özellikler

#### 2.4.3.1. Ablasyon oranı

Ablasyon oranı bir lazer atımı ile elde edilen derinliktir. Dalga boyu, enerji yoğunluğu, atım süresi, darbe tekrarlama frekansı gibi lazer parametrelerine ve malzemenin termofiziksel özelliklerine bağlı olarak değişir. Malzemelerin ablasyonu sonucunda yüzeyde çukurlar meydana gelir [11].

#### 2.4.3.2. Derinlik/çap oranı

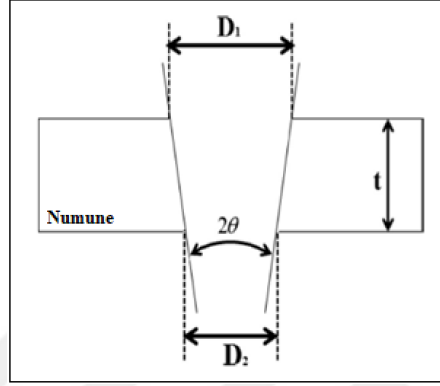
Delik derinliğinin, deliğin çapına olan oranıdır. Bu terim delik boyutunu tanımlamak için kullanılır. Malzemenin termofiziksel özelliklerine ve lazer ışınının optik özelliklerine bağlıdır. Kullanım amacına uygun olarak istenen değeri sağlayacak olan işlem parametrelerinin belirlenmesi önemlidir [9].

#### 2.4.3.3. Dairesellik

Delik daireselliği lazer işleminde yüzey performansını ve kalitesini etkileyen oldukça önemli bir özelliktir. Yüzeydeki minimum çapın maksimum çapa olan oranıdır. Hassas ve kaliteli bir delik için daireselliğin 1 değerine yakın olması istenmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde anizotropik malzeme yapısı ve fiberlerin ısı iletiminin daha yüksek olması sebebiyle yüzeyde eliptik bir geometri meydana geldiğinden bu pek mümkün olmamaktadır [9].

#### 2.4.3.4. Koniklik

Lazer ışınının yakınsanmasından dolayı, malzeme içerisindeki hareketi sonucunda giriş ve çıkış çapları arasında bir fark oluşur ve koniklik meydana gelir. Radyal yönde üniform olmayan bir derinlik elde edilir [53-54]. Delik konikliği Şekil 2.15'te gösterilmektedir;



Şekil 2.15. Koniklik yapısı

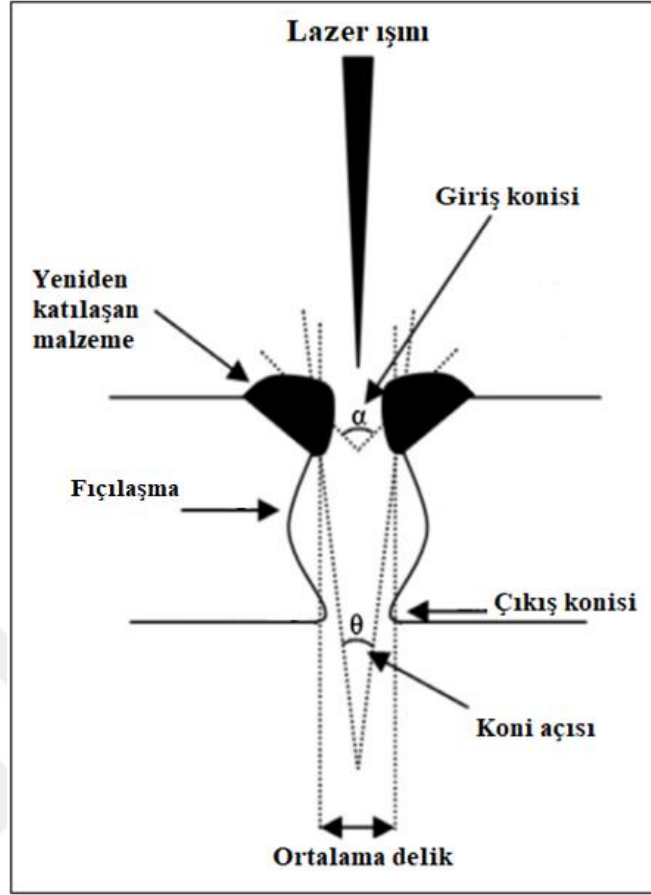
$D_1$  giriş çapını,  $D_2$  çıkış çapını,  $t$  numune kalınlığını,  $\Theta$  ise koni açısını temsil etmektedir. Delik konikliği Denklem (2.7)'ye göre hesaplanır [9];

$$\tan \Theta = (D_1 - D_2) / t \quad (2.7)$$

Koniklik lazer işlem parametrelerine bağlı olarak değişir. Hassas ve kaliteli bir delik için minimum koniklik istenir. Genellikle kalınlığı 0,25 mm'den az olan numunelerde önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Giriş çapı çıkış çapında büyük ise incelme sonucunda pozitif bir koniklik meydana gelir. Bazı durumlarda odak mesafesine de bağlı olarak negatif koniklik de söz konusu olabilmektedir [55].

#### 2.4.3.5. Fıçılama

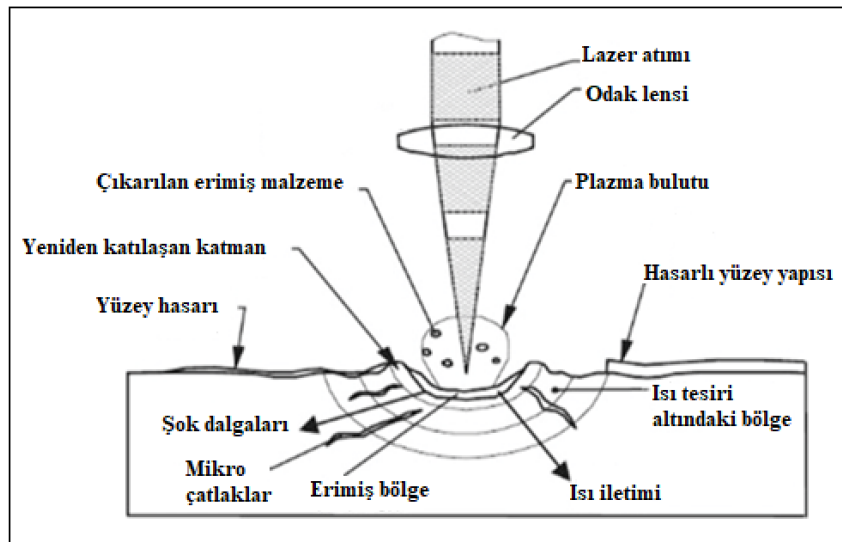
Lazer ile malzeme işlenmesi esnasında, çıkarılan malzemenin derinlik doğrultusu boyunca delik duvarlarını aşındırması sonucu oluşan geometrik bozukluk Şekil 2.17'de de görüldüğü üzere fıçıya benzer bir yapı oluşturur. Lazer işlemine maruz bırakılan iş parçasının kalınlığı ve işlenen bölgedeki yüksek basınç olumsuz bir şekilde etkimektedir. Lazer ile delinmiş bir deliğe ait giriş konisi, çıkış konisi, koni açısı, fıçılama, yeniden katılma malzeme gibi oluşan kusurlar Şekil 2.16'da ayrıca gösterilmektedir [56-57];



Şekil 2.16. Lazer ile delinmiş deliğin özellikleri [9]

#### 2.4.4. Metalürjik özellikler

Lazer işlemi sonucu malzeme yapısında meydana gelen metalürjik kusurlar Şekil 2.17’de görülmektedir;



Şekil 2.17. Metalürjik kusurlar

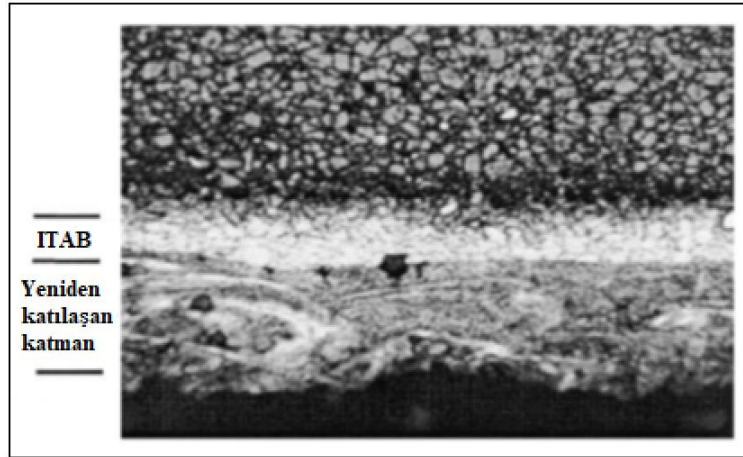


#### 2.4.4.1. Isı tesiri altındaki bölge

Malzeme yüzeyinde lazer ışının gelmesi sonucunda bir termal etkileşim gerçekleşir. Lazer ışınının yüksek sıcaklığı nedeniyle etkileşim alanı bölgesince malzemenin fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri değişir. Bu bölge işlem sırasında erimez fakat mikro yapı etkilenir. Malzemelerin lazer ile etkileşiminde ısı tesiri altındaki bölgenin boyutu önemli metalürjik performans özelliklerinden biridir. Çalışma parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte mümkün olan en düşük seviyeye sınırlandırılması gerekmektedir [9].

#### 2.4.4.2. Yeniden katılan katman

Lazer atımları sonrası erimiş malzemenin bir kısmı ablasyon göstermeyip malzeme kenarında tekrar katılabilir. Bu katmanın malzeme özellikleri ana malzemedan tamamen farklı olabilir. Mekanik özellikleri daha düşük, kırılabilir ve mikro çatlaklar meydana getirilebilir. Bu nedenlerden dolayı yeniden katılan katmandan kaçınılması gerekmektedir. Şekil 2.18’de yüzeye ait ısı tesiri altındaki bölge ve yeniden katılan katman örneği görülmektedir [58];



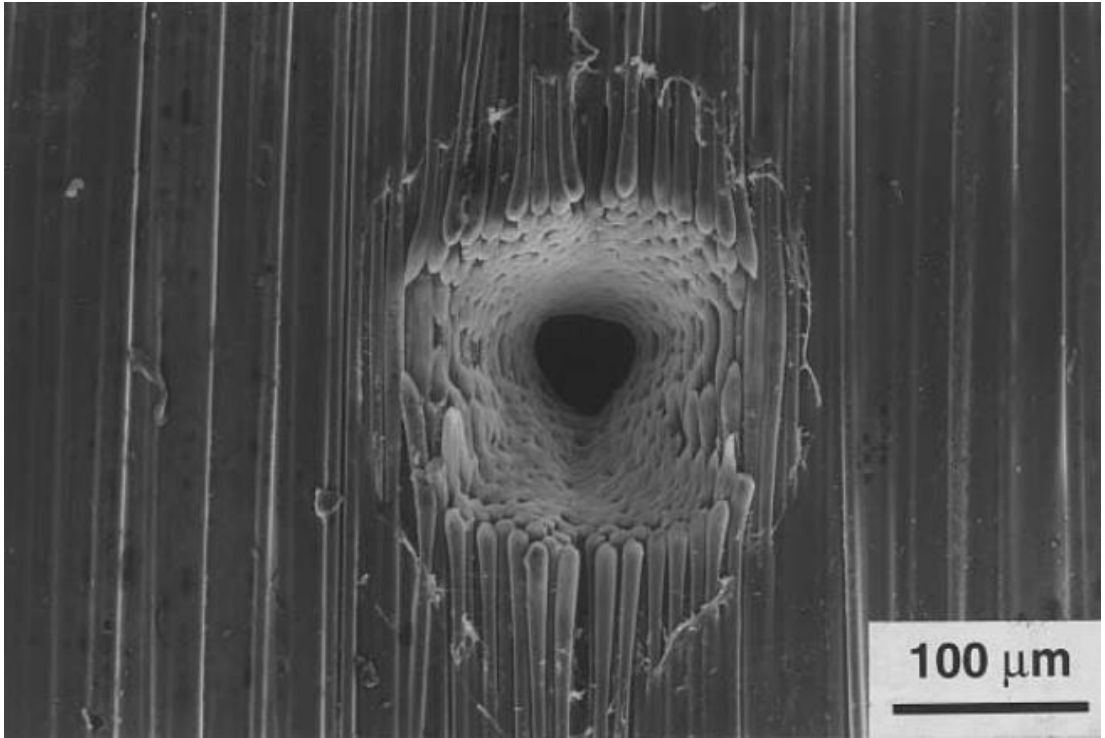
Şekil 2.18. Yeniden katılan katman [58]

#### 2.4.4.3. Mikro çatlaklar

Mikro çatlaklar genellikle kırılabilir ve yüksek sertleşebilme özelliğine sahip malzemelerin işlenmesi esnasında yüksek sıcaklık gradyanından dolayı meydana gelen kusurlardır.

#### 2.4.4.4. Fiber şişmesi

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin lazer ile etkileşimi sonucunda büyük ve hızlı termal genişleme sebebiyle lif uçlarında kayda değer bir seviyede şişme oluşmaktadır. Bu termal kusur Şekil 2.19'daki taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş görüntüde açıkça görülmektedir. Lif çapının %50'sine kadar artabildiği gözlemlenmiştir. Karbon fiber uçlarındaki önemli ölçüdeki şişme matrisi küçük bir kesit alanına sıkıştırır. Bu deliğin daha derin bölgelerinde matris buharlaşmasını engeller, yapısal bozulmalara sebep olur. Fiber şişmesinin mekanizması eş zamanlı olarak yapısal yeniden düzenlemeye ve safsızlıkların hızlı ısınmaya bağlı buharlaşmasına bağlıdır. Fiber şişmesi miktarı aynı zamanda elyaf tipine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek seviyelerdeki şişmelerin sadece düşük modüllü liflerde meydana geldiği ve ısı işlem ile önemli ölçüde azaltılabildiği gözlemlenmiştir. Isıl işlem safsızlıkları gidererek elyafların karbon içeriğini arttırmaktadır bu nedenler safsızlık ile fiber şişmesi arasında olası bir bağlantı kurulabilir. Fiber şişmesi boyutunun artan modül ile birlikte azaldığı ve yüksek modüllerde kayda değer bir şişme olmadığı görülmüştür [1, 59].



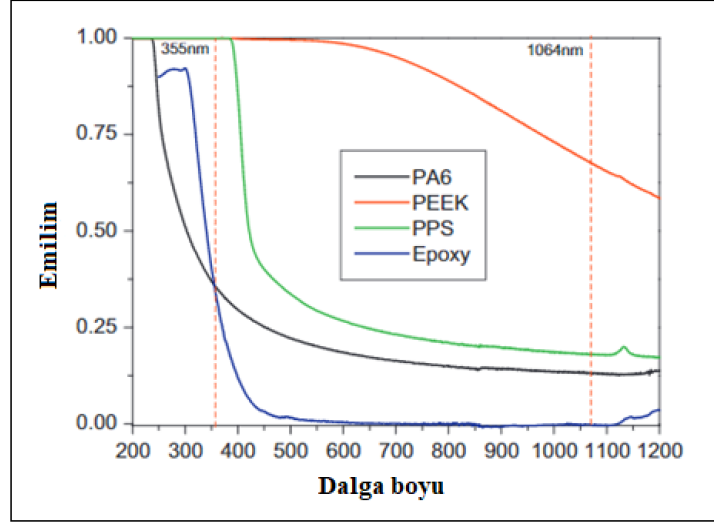
Şekil 2.19. Fiber şişmesi [59]

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzemeler

Termoplastik esaslı polimer malzemeler yüksek tokluk, darbe dayanımı gibi özelliklerinden ve kolay işlenebilir, şekillendirilebilir, geri dönüştürülebilir, depolanabilir olduklarından dolayı termoset polimerlere oranla daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda termosetlere kıyasla ürün maliyetleri daha düşüktür. Termoplastikler amorf ve yarı kristalin olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Amorf termoplastikleri karakterize etmek için camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) kullanılır ve malzemeler bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar işlenirler. Termoplastik esaslı kompozitler sahip oldukları spesifik mukavemet, rijitlik, geliştirilmiş kırılma tokluğu ve darbe dayanımı özellikleri sebebiyle havacılık uzay endüstrisinde ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [60-62].

Polimer matris malzemelerinde uygulanan mevcut lazer enerjisinin etkinliğinin belirlenmesinde çalışılan dalga boyu değerindeki emme katsayısı önemlidir. Yansıtıcılık göz ardı edilebilir bir kayıp çeşidiyken iletim yoluyla enerji kaybı oldukça önem arz etmektedir. Şekil 3.1’de matris malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan dört farklı polimer malzemenin çeşitli dalga boylarındaki lazer enerjisi emilim seviyelerinin analizi görülmektedir. Test edilen Poliamid 6 (PA6), Poli(eter-eter-eton) (PEEK), Polifenilen sülfid (PPS), Epoksi reçine esaslı polimerler arasında lazer ışınını en çok absorbe eden PEEK polimeri olmuştur. Lazer ışınımının dalga boyundaki artışla beraber lazer emilim seviyesinde düşüş görülmektedir. Karbon fiberler dalga boyu değerinden bağımsız olarak lazer radyasyonunu tamamen absorbe edebilmektedir [12]. Lazer ablasyonu deneysel çalışmaları kapsamında karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-eton) matrisli kompozit ve cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid matrisli kompozit olmak üzere iki farklı fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Lazer enerjisi emilim spektrumları [12]

### 3.1.1. Karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-keton)

Matris malzemesi olarak kullanılan polimerler arasında Poli(eter-eter-keton) (PEEK) termoset reçinelere kıyasla daha yüksek tokluk ve aşınma direnciyle öne çıkan bir termoplastiktir. Üstün mekanik, kimyasal ve termal özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda birçok alanda kullanılmaktadır. Saf haldeki PEEK'in düşük aşınma direnci ve yüksek sürtünme katsayısı kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Aşınma karakteristiğini iyileştirmek, sertliğini ve dayanımını arttırmak amacıyla genellikle karbon elyaf takviyesi uygulanır. Nispeten yüksek tokluğu ve yüksek sıcaklıklardaki yorulma dayanımı sebebiyle karbon fiber takviyeli PEEK havacılık, otomotiv, biyomedikal gibi alanların tribolojik uygulamalarında tercih edilen iyi bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. PEEK matrisin sunduğu yüksek mekanik özellikler ve kimyasal direnç 150 °C'ye kadar korunduğu için CF - PEEK 300 °C'den yüksek servis sıcaklıkları sağlamaktadır. Karbon fiberlerin pürüzsüz yüzeyleri ve kimyasal saflıkları kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini etkileyen ara yüzey tutunma performansını oldukça fazla etkilemektedir. Karbon elyaf takviyeli PEEK matrisli kompozitler yüksek dayanıklılık ile mükemmel bir aşınma direncine sahip benzersiz malzemelerdir [5-6, 63].

Deneyisel çalışmada ağırlıkça %34, hacimce %59 fiber içeren reçine içeriğine sahip sürekli yönlendirilmiş karbon fiber takviyeli PEEK plakalar (Cetex TC1200 AS-4) kullanılmıştır. Tablo 3.1'de numunelerinin bazı malzeme özellikleri gösterilmektedir;

Tablo 3.1. Sürekli karbon fiber takviyeli PEEK'in malzeme özellikleri [64]

| Özellikler              | Değer  | Birimi | Test Standartı    |
|-------------------------|--------|--------|-------------------|
| Poisson oranı           | 0,33   | -      | ASTM D3039        |
| Elastisite modülü (0°)  | 130000 | MPa    | ASTM D3039        |
| Elastisite modülü (90°) | 10000  | MPa    | ASTM D3039        |
| Erime sıcaklığı         | 343    | °C     | ISO 11357-1/-3    |
| Camsı geçiş sıcaklığı   | 143    | °C     | ISO 11357-1,-2,-3 |

Karbon elyafın buharlaşma sıcaklığı yaklaşık 330-385 °C iken PEEK'in erime sıcaklığı yaklaşık 350 °C'dir [12, 63-65]. Bu yüzden bazı bölgelerde matris erimesi gözlenirken fiberlerin erimediği ve açıkça görüldüğü gözlemlenmiştir.

### 3.1.2. Cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid

Polifenilen sülfid (PPS) termoplastik esaslı bir polimer matris malzemesidir. Yarı kristal yapılıdır. Yüksek sıcaklık direncine ve yüksek kimyasal dirence sahiptir. Yüksek çalışma sıcaklıkları altında boyutsal kararlılığını korur ve kimyasal ortamlarda çözünmez. Oldukça yüksek mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Yorulma direnci yüksektir. Bu olumlu özelliklerinden dolayı havacılık ve otomotiv alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajların yanı sıra düşük kopma uzaması, gevrek davranış sergilemesi ve yüksek maliyetli olması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için takviyeler sonucu kompozit malzemeleri meydana getirilir. Viskoziteleri düşük olduğundan dolayı yüksek oranlarda takviye yapılabilir [66].

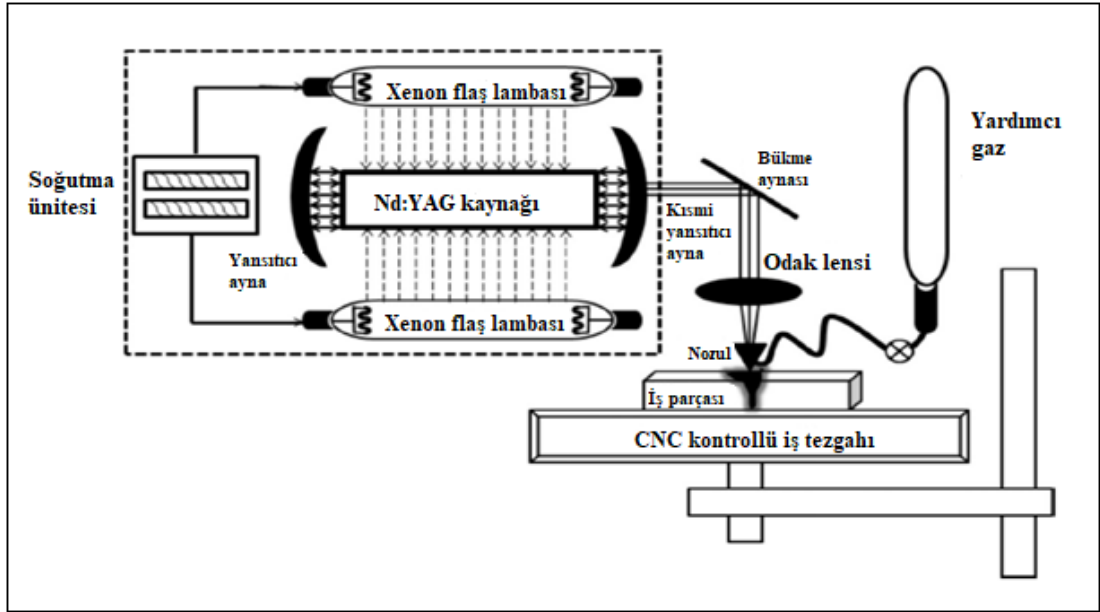
Deneysel çalışmada rastgele yönlendirilmiş %40 oranında kısa cam fiber takviyeli PPS plakalar (Calanese Fortron 1140 L4) kullanılmıştır. Tablo 3.2'de numunelerinin bazı malzeme özellikleri gösterilmektedir;

Tablo 3.2. Kısa cam fiber takviyeli PPS'in malzeme özellikleri [67]

| Özellikler                         | Değer | Birimi            | Test Standartı    |
|------------------------------------|-------|-------------------|-------------------|
| Yoğunluk                           | 1650  | kg/m <sup>3</sup> | ISO 1183          |
| Elastisite modülü                  | 14700 | MPa               | ISO 527-2/1A      |
| Erime sıcaklığı 10°C/dk            | 280   | °C                | ISO 11357-1/-3    |
| Camsı geçiş sıcaklığı 10°C/dk      | 90    | °C                | ISO 11357-1,-2,-3 |
| Isı bozulma sıcaklığı (1,8 MPa'da) | 270   | °C                | ISO 75-1,-2       |
| Özgül ısı kapasitesi               | 1500  | J/(kg.K)          | -                 |

### 3.2. Lazer Prosesi

Deneysel çalışmalarda Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarlarında bulunan 1064 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG tipi tek atımlı (GSI lumonics JK760TR) lazer mekanizması kullanılmıştır. Lazer sistemi ortalama 600 watt gücüne, 0,3 - 50 milisaniye arasında atım süresine ve 500 hz darbe tekrarlama frekansına sahiptir. Lazer kaynağı tarafından üretilen yüksek enerjili lazer ışını fiber optik kablolar vasıtasıyla iletilip dış bükey bir merceğe sahip odak lensinde yakınsanır, tek bir noktada toplanır ve numune üzerine gönderilir. İş parçası üç eksenli çalışan bir CNC kontrol mekanizması ile konumlandırılarak istenilen geometriye ve odak mesafesine uygun şekilde ayarlanır. İşlem sırasında soğutma ve erimiş malzemeyi uzaklaştırma amacıyla yardımcı gaz kullanılabilir. Şekil 3.2'de kullanılan lazer düzeneğinin bir taslağı görülmektedir [9].



Şekil 3.2. Lazer düzeneği [9]

Uygun lazer parametrelerini belirlemek için çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Mathew ve arkadaşları yaptıkları çalışmada fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin lazer ile işlenmesinde darbe tekrarlama frekansı, atım süresi ve enerji yoğunluğunun ısı tesiri altındaki bölge üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve çalışmalarının benzer türdeki diğer malzemelerin kaliteli bir şekilde işlenebilmesi için de etkili bir şekilde gerçekleşebileceğini önermişlerdir [4].

Deneyleer sırasında sarakıyyla 0,1, 1, 2, 3, 4 Joule olmak üzere beş farklı enerji, 2, 4, 6, 8, 10 milisaniye olmak üzere beş farklı atım süresi ve yüzeye sıfır, yüzeyin 1 mm altı ve yüzeyin 1 mm üstü olmak üzere üç farklı odak mesafesi kullanılarak toplam 75 farklı yüzey dokusu elde edildi. Odak noktası yarıçapı yüzeyde 200 µm iken yüzeyin 1 mm altında ve 1 mm üstünde seviyelerinde 250 µm değerindedir. Enerji yoğunluğu, enerjinin odak noktası alanına oranı ile hesaplandı.

Çalışma parametreleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Deneyleer esnasında koruyucu gaz kullanılmamıştır.

Tablo 3.3. Çalışma parametreleri

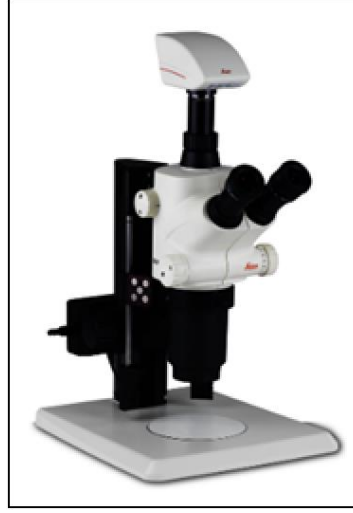
| Atım Süresi (ms) | Enerji (J) | Enerji Yoğunluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |                           |
|------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------|
|                  |            | (Yüzeye sıfır odak)                   | (Yüzey altı ve üstü 1 mm) |
| 2                | 0,1        | 79,57                                 | 50,92                     |
| 4                | 1          | 795,77                                | 509,29                    |
| 6                | 2          | 1591,54                               | 1018,59                   |
| 8                | 3          | 2387,32                               | 1527,88                   |
| 10               | 4          | 3183,09                               | 2037,18                   |

Deneysel çalışmalarda her bir parametre kombinasyonu değeri birden fazla sayıda gerçekleştirilmiştir. Fakat malzemenin üniform bir yapıya yakın oluşu ve lazer işleminin kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesinden dolayı elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Standart sapma mikronlar mertebesinde olup yok denecek kadar az bir miktarda olduğundan dolayı sunulan grafiklerde belirtilmemiştir.

### 3.3. İnceleme Yöntemleri

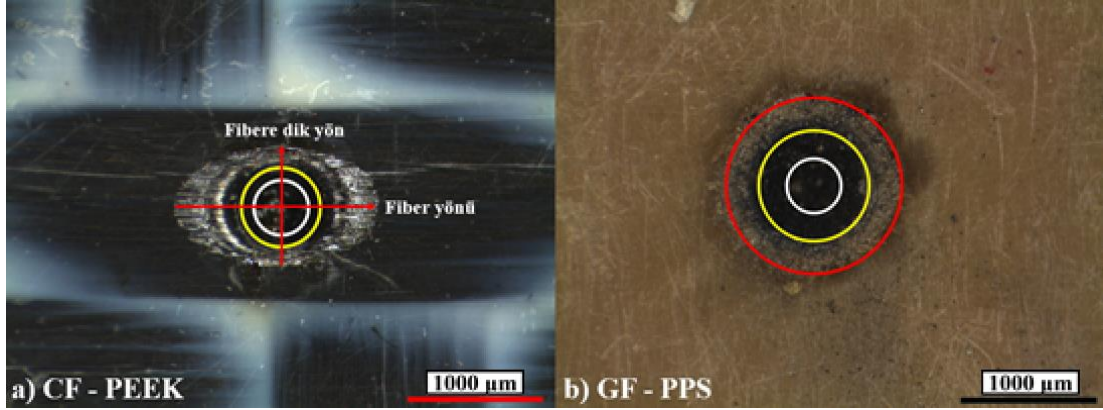
#### 3.3.1. Stereo mikroskop

Lazer işleme maruz kalan numunelerin makro boyutta morfolojik inceleme ve analizlerinin yapılması için, Şekil 3.3'te gösterilen Leica stereo mikroskop kullanılarak iki boyutlu yüzey görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Stereo mikroskop

Şekil 3.4'te ablyasyona uğramış CF - PEEK ve GF - PPS kompozitlerinin stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntülerinin birer örneği görülmektedir. Lazerin odak noktası beyaz daire ile işaretlenmiştir. Sarı ile gösterilen bölge buharlaşma alanı, kırmızı ile gösterilen bölge matris erimesi olarak tanımlandı. Matris erime bölgesindeki minimum çapın maksimum çapa oranı dairesellik olarak tanımlanmıştır.

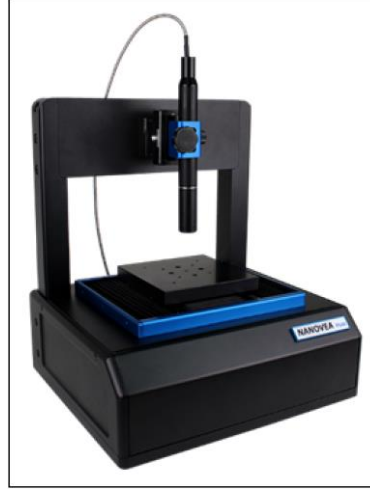


Şekil 3.4. Kullanılan kompozit malzemelerin stereo mikroskop görüntüleri örneği

### 3.3.2. Optik profilometre

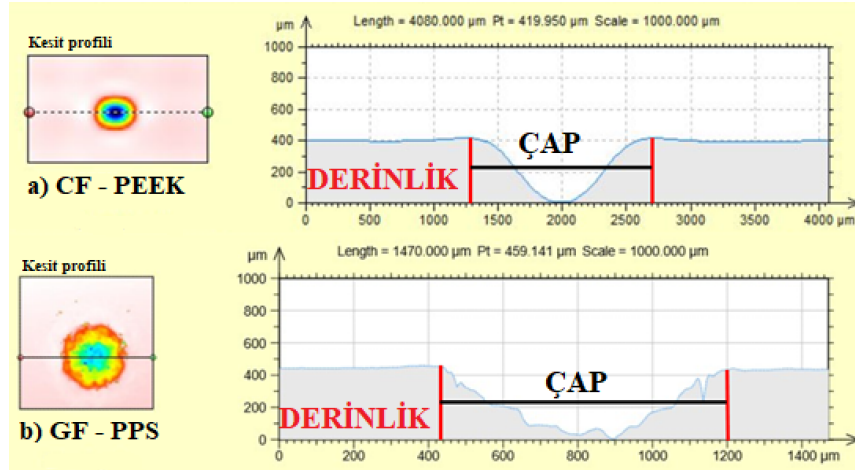
Lazer işlemi sonucu ablyasyona uğramış yüzeylerin yüzey topografilerini ve yüzey pürüzlülüklerini incelemek için Şekil 3.5'te gösterilen optik profilometre (Nanovea PS50, USA) kullanılmıştır.





Şekil 3.5. Optik profilometre

Şekil 3.6’da lazer ablasyonuna uğramış CF-PEEK ve GF-PPS kompozitlerinin optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüsünün birer örneği görülmektedir. Kırmızı çizgiler ile gösterilen uzunluklar bir lazer atımı ile elde edilen derinliktir ve ablasyon oranı olarak tanımlanmıştır. Siyah çizgiler ile gösterilen uzunluklar ise çap olarak tanımlanmıştır. Derinlik/çap oranı verileri bu tanımlamalar doğrultusunda elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Kullanılan kompozit malzemelerin optik profilometre görüntüleri örneği

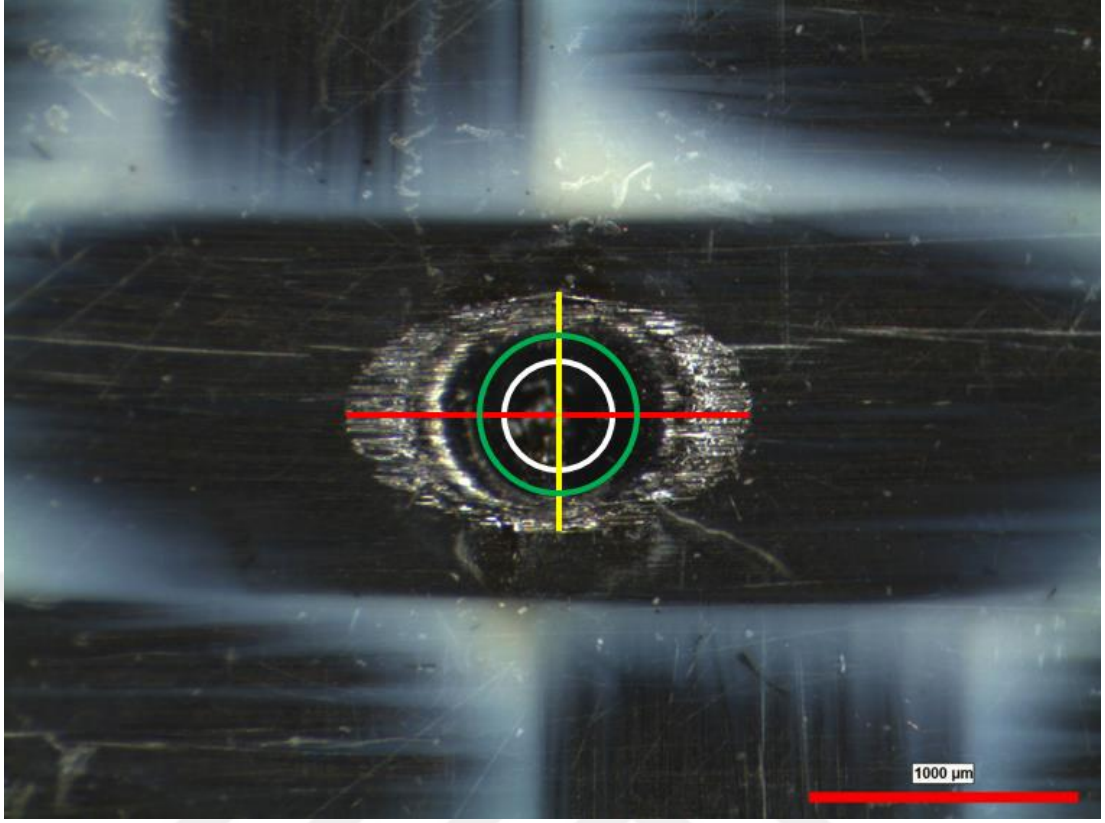
#### **4. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Tez çalışmaları kapsamında sürekli karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-keton) ve kısa cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid olmak üzere iki farklı fiber tipiyle ve şekliyle desteklendirilmiş polimer matrisli kompozit malzemenin her birinin yüzeyinde; 1064 nm dalga boyuna sahip, Nd:YAG tipi tek atım darbeleri lazer kullanılarak, 5 farklı enerji yoğunluğunda, 5 farklı atım süresinde ve 3 farklı odak alanı mesafesinde, lazer ablasyonu ile yüzey dokuları oluşturulup; elde edilen 75 farklı çukurun geometrik yapısı ve yüzey özellikleri stereo mikroskop ve optik profilometre vasıtalarıyla incelenip; kullanılan farklı lazer parametrelerinin yüzey performansına olan etkileri incelenmiştir.

Elde edilen bulgular bu bölümde, kullanılan malzemeler özelinde üç farklı başlık altında irdelenip, lazerin çalışma mekanizması hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Matris erimesi, ablasyon oranı, dairesellik ve derinlik/çap oranı olmak üzere dört farklı kalite parametresi incelenmiştir. Kaliteli yüzeylerin eldesi amacıyla parametre optimizasyonu hedeflenmiştir.

##### **4.1. Karbon Fiber Takviyeli Poli(eter-eter-keton) Yüzey Dokusu Deneysel Çalışmaları**

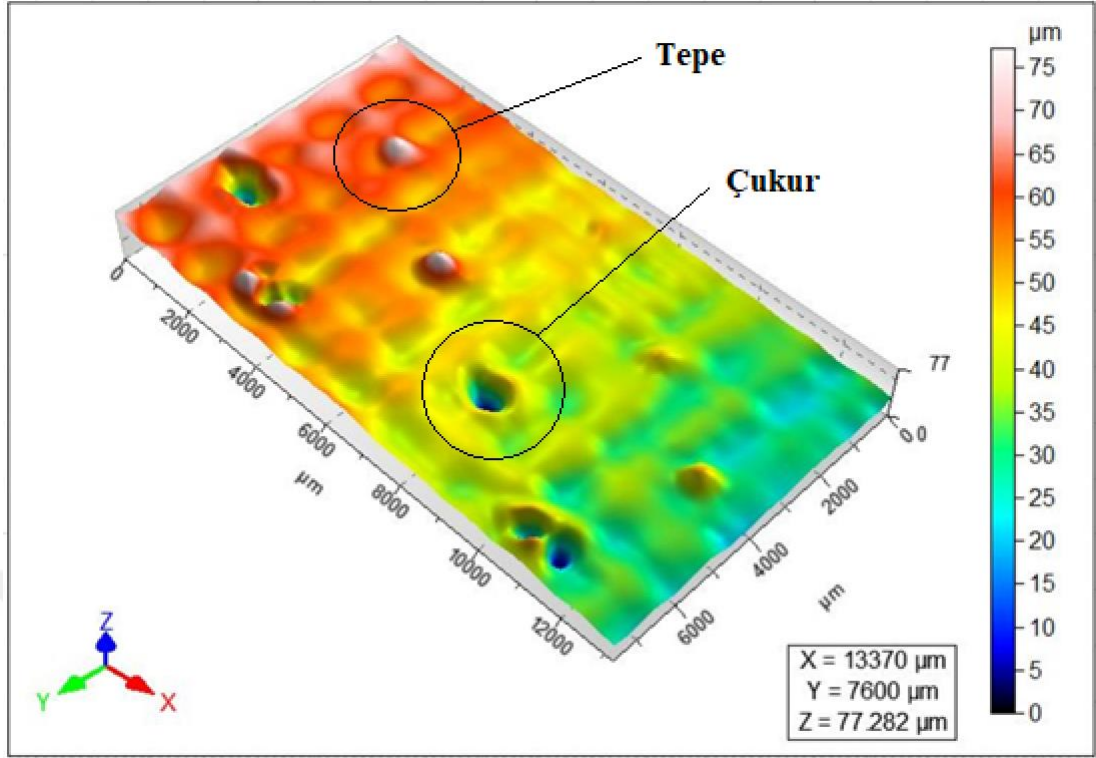
CF - PEEK yüzeyine gönderilen yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışınının malzeme ile termal etkileşimi sonucunda oluşan yüzeyin yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Odak alanı beyaz daire ile işaretlenmiş olup bu bölgede sıcaklık maksimum değerdedir. Hem polimer matrisin hem de karbon fiberlerin buharlaştığı gözlemlenmektedir. Odak noktası alanı sınırlarından uzaklaştıkça sıcaklık değeri azalmaktadır. Yeşil ile işaretli bölgede polimer matrisin buharlaştığı fakat fiberlerin buharlaşmadığı görülmektedir. Sarı ve kırmızı ile sınırları belirtilmiş alanda matrisin hem fiber yönünde hem de fiber yönüne dik yönde eridiği fakat karbon fiberlerin açıkça seçilebildiği ve buharlaşmadığı görülmektedir.



Şekil 4.1. CF - PEEK termal etkileşim kategorizasyonu

Bu farklı termal etkileşim bölgelerinin varlığının nedeni karbon fiberlerin buharlaşma sıcaklığı yaklaşık olarak 330-385 °C aralığındayken PEEK polimerinin erime sıcaklığı yaklaşık olarak 350 °C'dir [12, 63-65]. Bu yüzden bazı bölgelerde matris erimesi gözlenirken fiberlerin erimeyeceği ve de net bir şekilde görüldüğü gözlemlenmiştir.

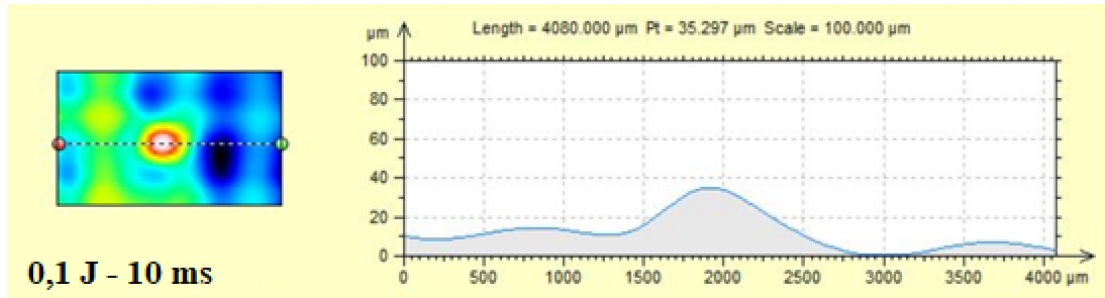
0,1 J enerji değerine sahip lazer atımlarında ( $79,57 \text{ J/cm}^2$ ) yeterli enerji yoğunluğu elde edilemediğinden dolayı oluşan yüzey dokusunun yapısı çukur şeklinde değil de tepe şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut enerji yoğunluğu termal genleşmeler meydana getirip malzeme içerisinde boşluk oluşturmuş, bir yükselti meydana getirmiş fakat malzeme çıkarımını ve çukur oluşumunu gerçekleştirecek kadar yeterli olamamıştır. Düşük enerji yoğunluğu sebebiyle oluşan tepe dokusu örneklerinin, diğer çukur yapısındaki yüzey dokuları ile olan farkı Şekil 4.2'de görülmektedir;



Şekil 4.2. Ablasyon sonucu yüzey dokusu yapısı

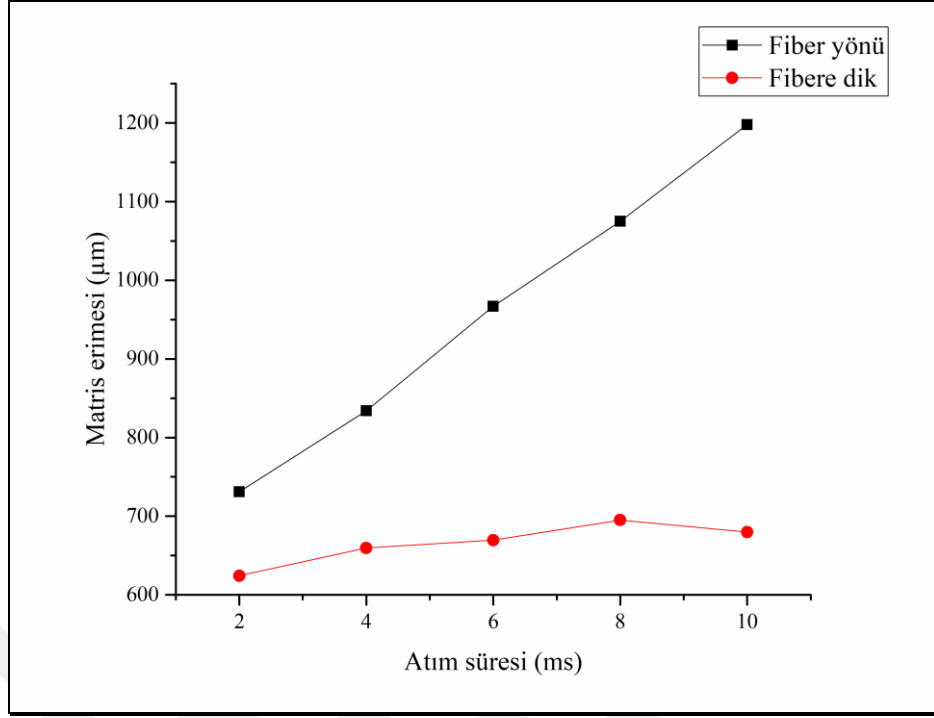
Himmelbauer ve arkadaşları ablasyonun lazer enerjisinin eşik değerini geçtikten sonra gerçekleşmeye başladığını ve bu eşğin atım süresi ile azaldığını bildirdiler [37].

Çalışma kapsamında çalışılan en düşük enerji yoğunluğuna ( $79,57 \text{ J/cm}^2$ ) maruz kalmış yüzeyin 10 ms atım süresine ait kesit görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Lazer ablasyonu sonucu oluşan tepe yaklaşık olarak  $35 \mu\text{m}$  yüksekliğine sahiptir.



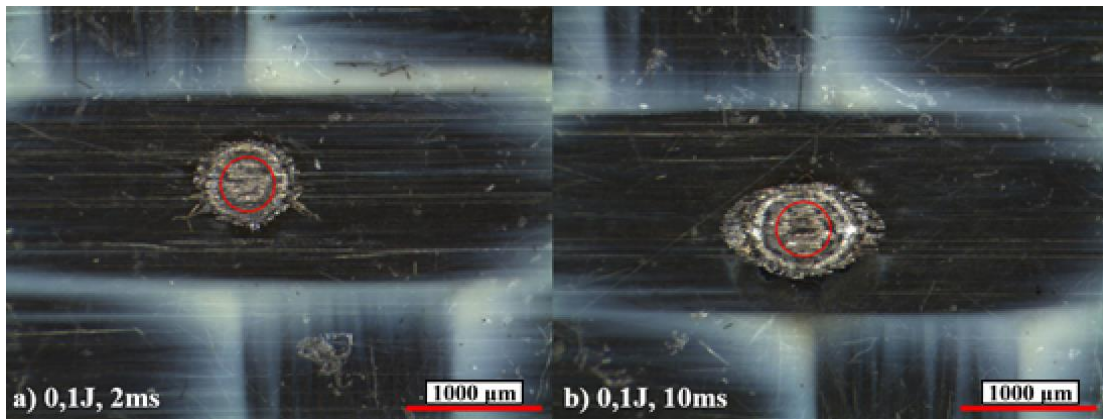
Şekil 4.3 Ablasyon sonucu oluşan tepenin kesit görüntüsü

Şekil 4.4'te yüzeye sıfır odakta,  $400 \mu\text{m}$  tarama çapında, en düşük enerji yoğunluğu değerindeki ( $79,57 \text{ J/cm}^2$ ) lazer ablasyonunun oluşturduğu tepelerin 5 farklı atım süresinde yüzeydeki matris erimeleri incelenmiştir;



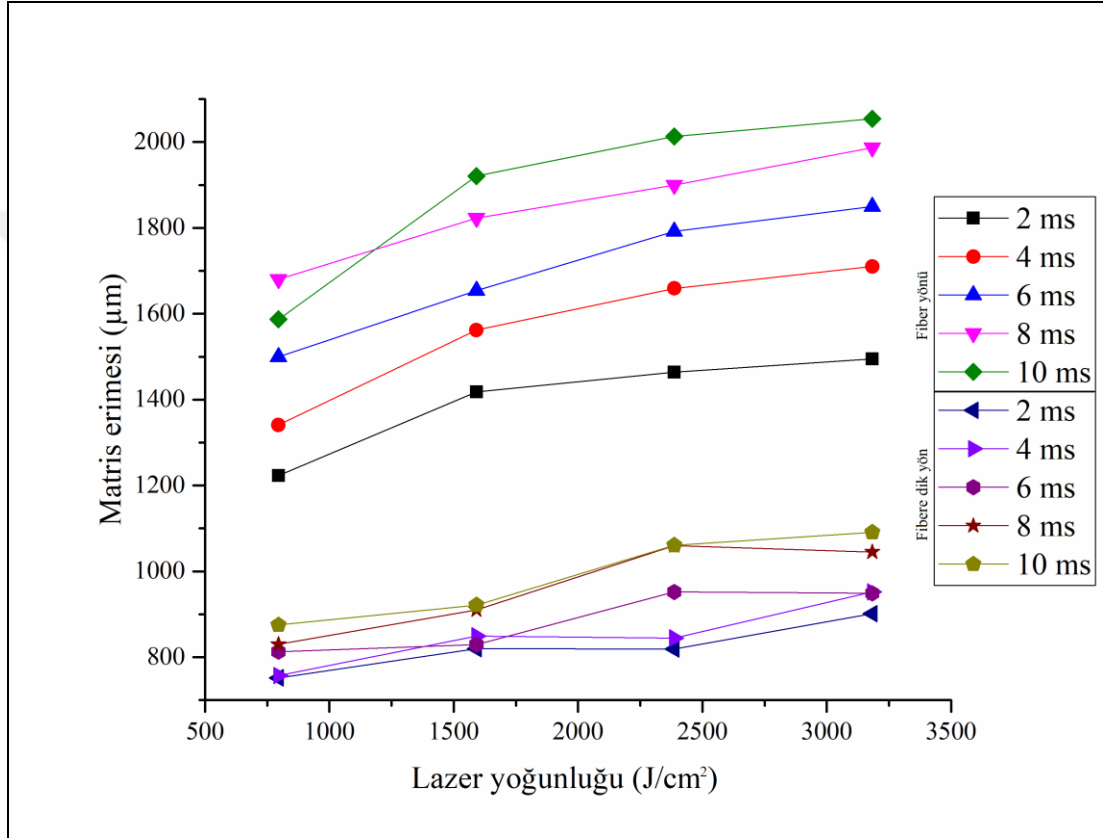
Şekil 4.4. Tepelerin yüzeydeki matris erimelerinin grafiği

Fiber yönündeki ısı iletiminin daha yüksek olmasından dolayı o doğrultudaki matris erimesinin çok daha fazla olduğu görülmektedir. Karbon fiberlerin doğrultusundaki matris erimesi artan atım süresiyle birlikte lineer olarak artarken, fiber yönüne dik yöndeki matris erimesindeki artış oldukça azdır. Şekil 4.5'te yeterli enerji yoğunluğunun sağlanamaması sonucu oluşan tepelerin çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük ve en yüksek atım süresi değeri olan 2 ms ve 10 ms altındaki yüzey yapıları görülmektedir. Odak alanı kırmızı daire ile işaretlenmiştir. Atım süresindeki artışla birlikte fiber yönündeki matris erimesindeki daha yüksek orandaki artış ve yüzeydeki eliptik yapı görülmektedir.



Şekil 4.5. Tepelerin yüzeydeki matris erimleri

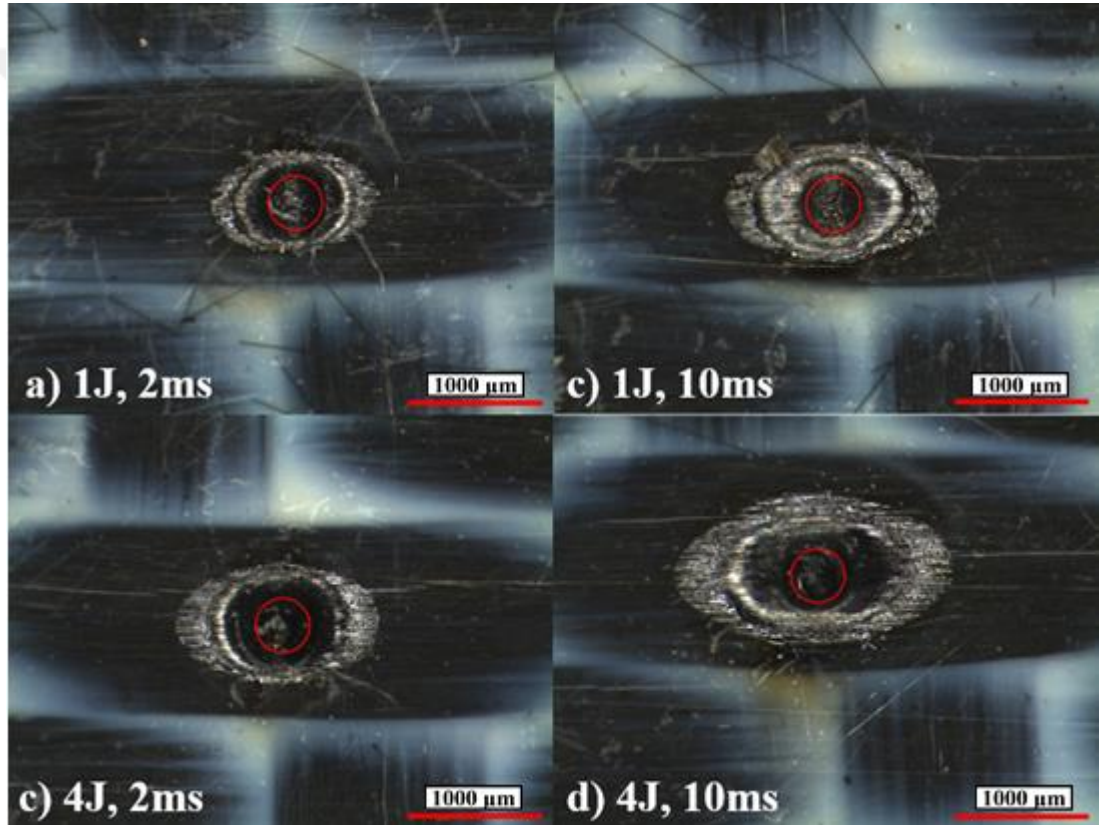
Lazer enerji yoğunluğu gereken eşik seviyeyi aştıktan sonra lazer ablasyonu sonucu yüzeyde çukur yapıları oluşmuştur. Şekil 4.6'da yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının yüzeydeki matris erimesi üzerindeki etkisi görülmektedir. Grafiğin üst bölümündeki dört eğri fiber yönündeki matris erimesini, alt bölümündeki dört eğri ise fibere dik yöndeki matris erimesini temsil etmektedir.



Şekil 4.6. CF - PEEK matris erimesi grafiği

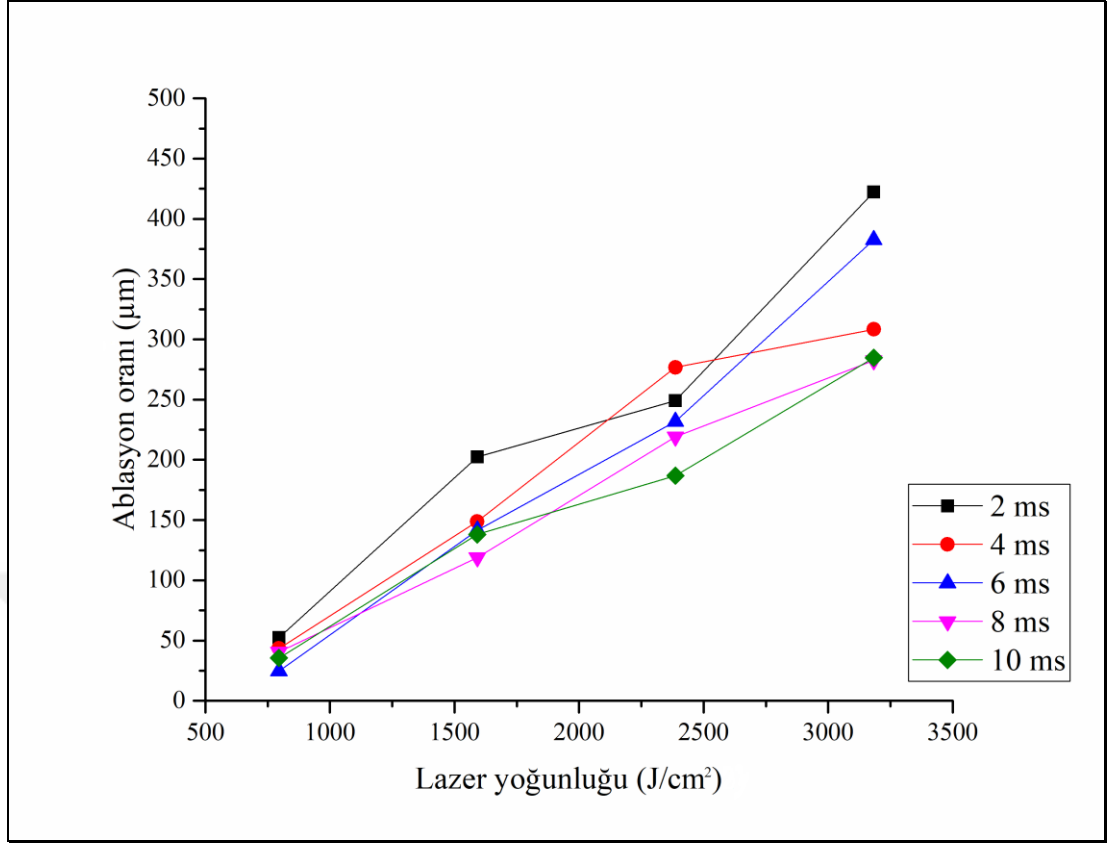
Isı iletimi karbon fiberlerin ısı iletim katsayısının daha yüksek olmasından dolayı fiber yönünde daha fazla gerçekleşmektedir. Bu nedenle erimiş yüzeyde eliptik bir yapı meydana gelmektedir. Fiber yönündeki matris erimesi fibere dik yönle kıyaslandığında neredeyse iki kat daha fazladır. Bu fark dairesellik için önemlidir. Aynı atım sürelerinde, lazer enerji yoğunluğundaki artışla matris erimesinin azalarak artan şekilde arttığı görülmektedir. Karbon fiber yönündeki matris erimesi artış hızında bir azalma söz konusudur. Fiber yönüne dik yöndeki matris erimesindeki artış ise fiber yönüne kıyasla oldukça düşüktür.

Şekil 4.7’de matris erimesi grafiğindeki uç değerlere karşılık gelen lazer parametrelerine ait matris erimelerinin yüzey görüntüleri verilmiştir. Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiştir. Bu bölgelerde karbon fiberlerin dahi buharlaştığı görülmektedir. Karbon fiberler doğrultusunda ısı dağılımını incelendiğinde erimiş PEEK polimer matrisi nedeniyle fiberler açıkça seçilebilmektedir. Aynı lazer yoğunluğu değerlerinde, daha düşük atım sürelerinde lazerin enerjisi malzeme tarafından daha iyi absorbe edildiğinden dolayı bozunma daha az olacaktır. Böylece enerji matris yüzeyinde erimeye değil derinlik boyunca artışa sebep olacaktır. Enerji yoğunluğunun ve atım süresinin derinlikteki artışa etkisi ablyasyon oranı çalışmalarında irdelenmiştir.



Şekil 4.7. CF - PEEK matris erimesi yüzey görüntüsü

Lazer ile malzemenin etkileşimi sonucu termal gerilmeler ve yüzeyde buharlaşma termal ablyasyona neden olmuştur. Şekil 4.8’de yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının ablyasyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Ablyasyon oranı bir lazer atımı ile elde edilen derinliktir.



Şekil 4.8. CF - PEEK ablasyon oranı grafiği

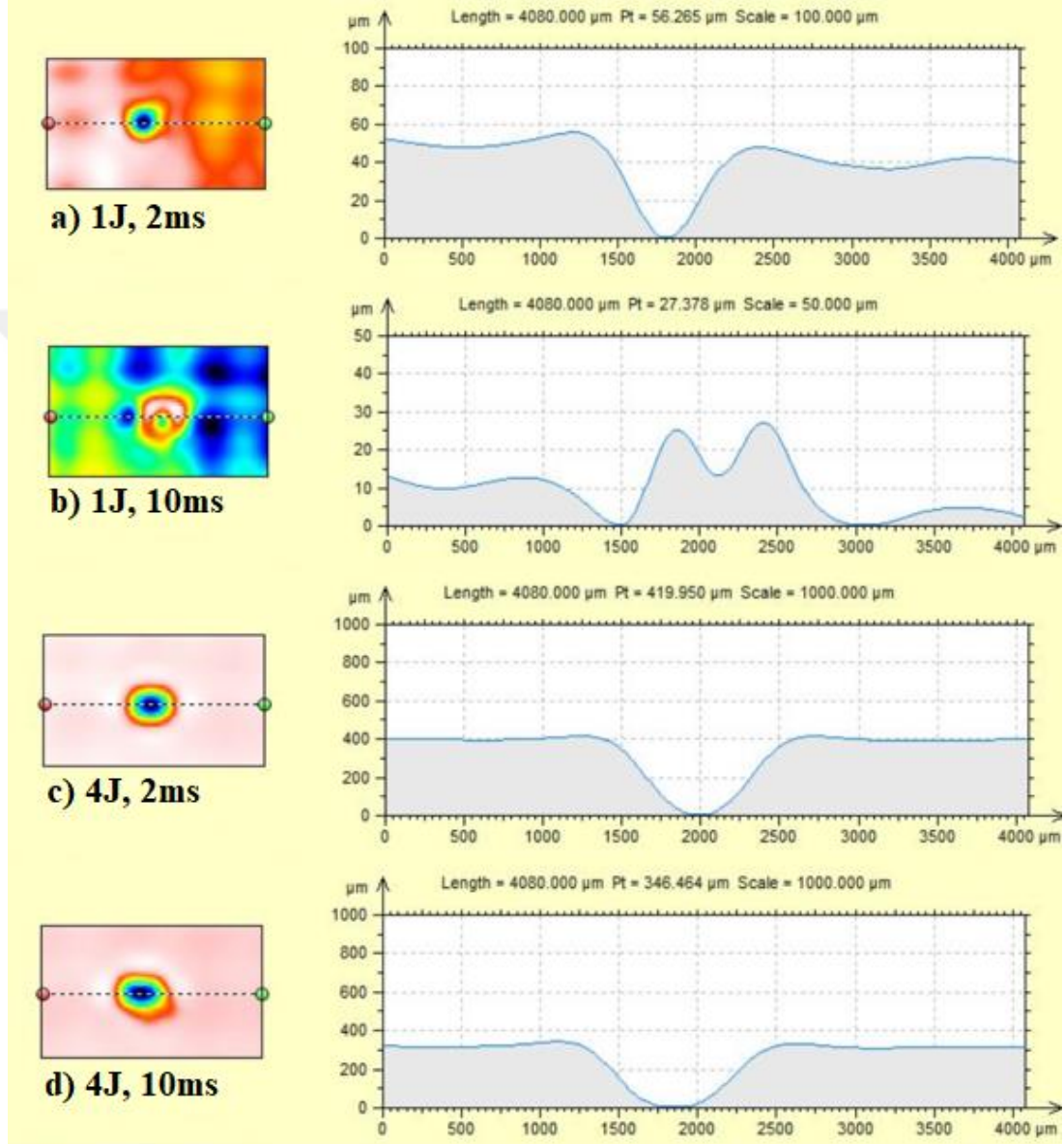
Polimerlerin lazer ablasyonu üzerine yapılan çalışmalarda ablasyon oranının lazer enerjisi ile birlikte arttığını gözlemlemiştir [35-36].

Deneysel sapmalar göz ardı edildiğinde, lazer yoğunluğundaki artışla birlikte ablasyon oranının lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Matris erimesinin artış hızındaki gibi bir azalma söz konusu değildir. Lazer enerjisi yüzeyde yayılmak yerine derinlik boyunca ilerlemektedir. Böylece lazer enerjisi yüzeyde matris erimesinden ziyade ablasyon oranında artışı sağlar. Termal ablasyon mekanizması ile üniform bir malzeme çıkarımı gerçekleşmiştir. Ayrıca lazer atım süresi kısaldıkça ablasyon oranında bir artış gözlenmektedir. Bunun nedeni kısa atım sürelerinde elde edilen yüksek tepe yoğunluğu ile termal difüzyon meydana gelmeden lazer enerjisi gönderilir. Böylece termal bozulmalar olmadan yüksek hassasiyette ve verimlilikte lazer işlemi gerçekleştirilir [34].

Şekil 4.9'da ablasyon oranı grafiğindeki uç değerlere karşılık gelen lazer parametrelerine ait çukur dokularının optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir. Ablasyon sonucu küresel yapıda yüzey morfolojileri meydana



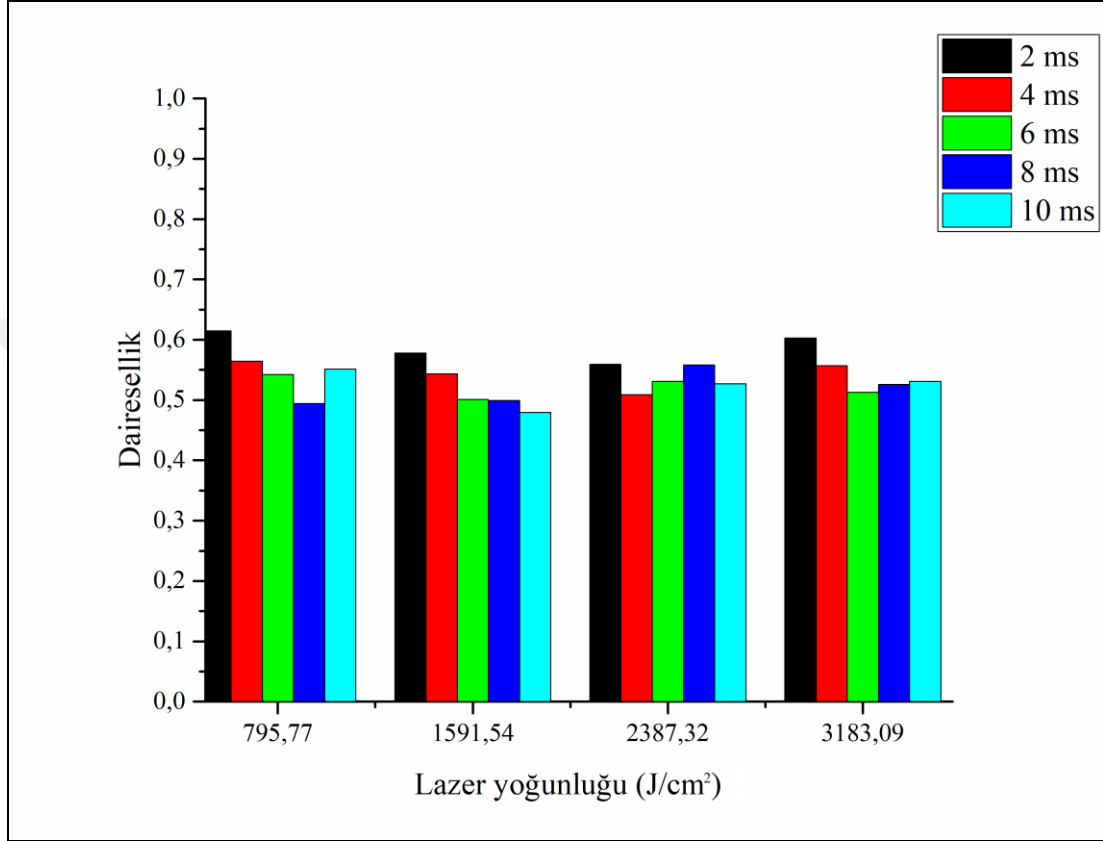
gelmiştir. Verilen yüzey morfolojileri incelendiği zaman aynı enerji yoğunluğu değerinde atım süresi artınca derinliğin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda lazer ablasyonu sonucu çukurların çevresinde oluşan şişme, Himmelbauer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre polimer amorfizasyonundan dolayı meydana gelmektedir [37].



Şekil 4.9. CF - PEEK ablasyon oranı kesit görüntüsü

Isı iletim katsayısı PEEK matrisinden daha fazla olan karbon fiberler, malzemeye sürekli uzun fiber şeklinde takviye edildikleri için elde edilen kompozit yapıya anizotropik ve heterojen özellik katmıştır. Bu nedenle lazer enerjisinin yarattığı ısı fiber yönünde daha fazla iletilerek yüzeyde eliptik bir yapı oluşacaktır. Şekil 4.10'da yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer

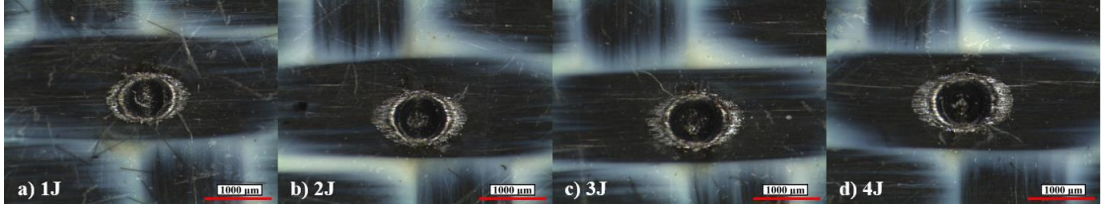
enerjisi yoğunluğunun artışının dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir. Dairesellik, yüzeydeki matris erimesi sonucu oluşan yapının minimum çapının, maksimum çapına olan oranıdır. Bu çalışmada minimum çap fiberlere dik yönde, maksimum çap ise fiber yönünde meydana gelmektedir.



Şekil 4.10. CF - PEEK dairesellik grafiği

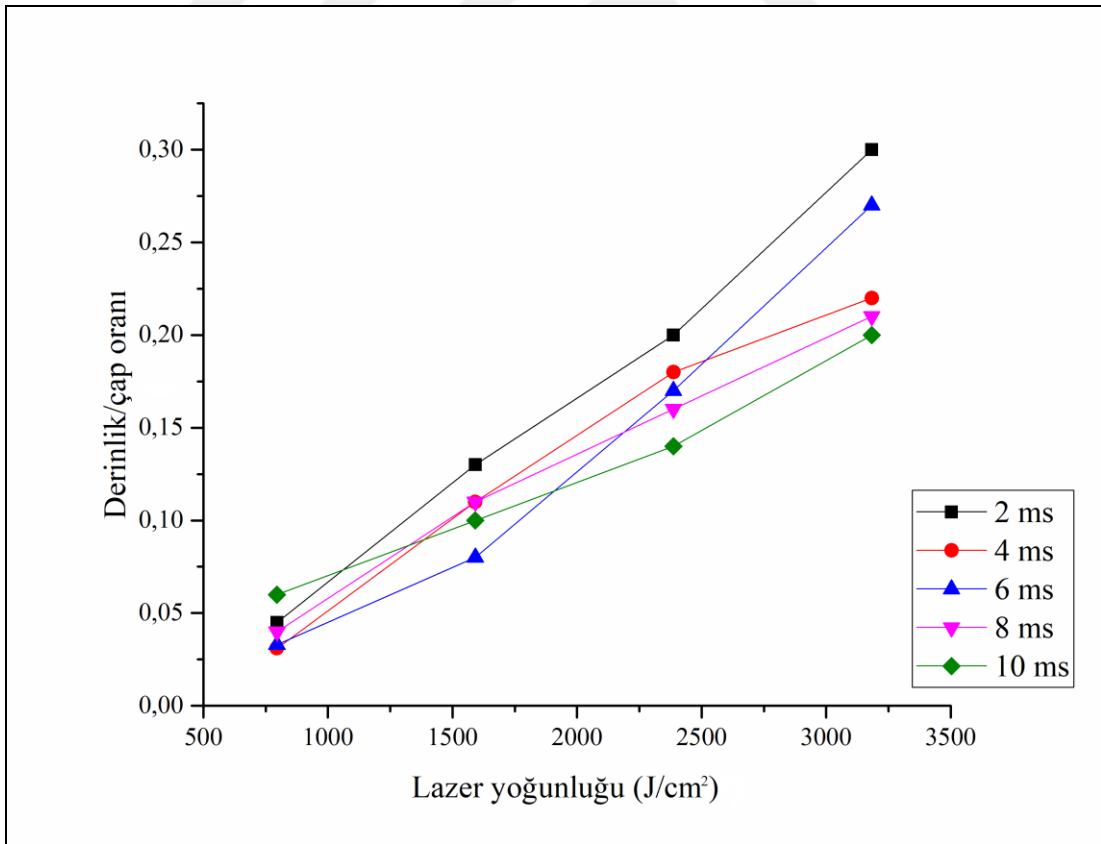
Kaliteli ve hassas bir yüzey dokusu için daireselliğin 1 değerine yakın olması istenirken sürekli fiber takviyesinden dolayı ısı iletimi homojen bir şekilde gerçekleşmeyip yüzeyde dairesel yapıdan uzak eliptik geometriler meydana gelmiştir. Fiber yönündeki matris erimesi fiber yönüne dik yöndeki matris erimesinden neredeyse iki kat daha fazladır. Dairesellik oranı farklı atım sürelerinde 0,5 - 0,6 değerleri arasında değişmektedir. Düşük atım süresi değerlerinde lazer ablasyonu sonucu elde edilen çukurların dairesel geometriye daha yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de tez çalışması kapsamında çalışılan en düşük atım süresi değeri olan 2 ms altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J, 4 J lazer enerjisi değerlerinde lazer yoğunluğuna maruz kalmış yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Sürekli karbon elyaf takviyesi sebebiyle yüzeyde oluşan eliptik geometriler açıkça görülmektedir. Farklı enerji değerlerinde

karbon elyaf takviyesi yönündeki matris erimeleri, dik yöndeki erimelerden yaklaşık olarak 1,5 - 2 kat daha fazladır. Lazer enerji yoğunluğundaki artışla birlikte yüzeydeki dairesellikte artış görülmektedir.



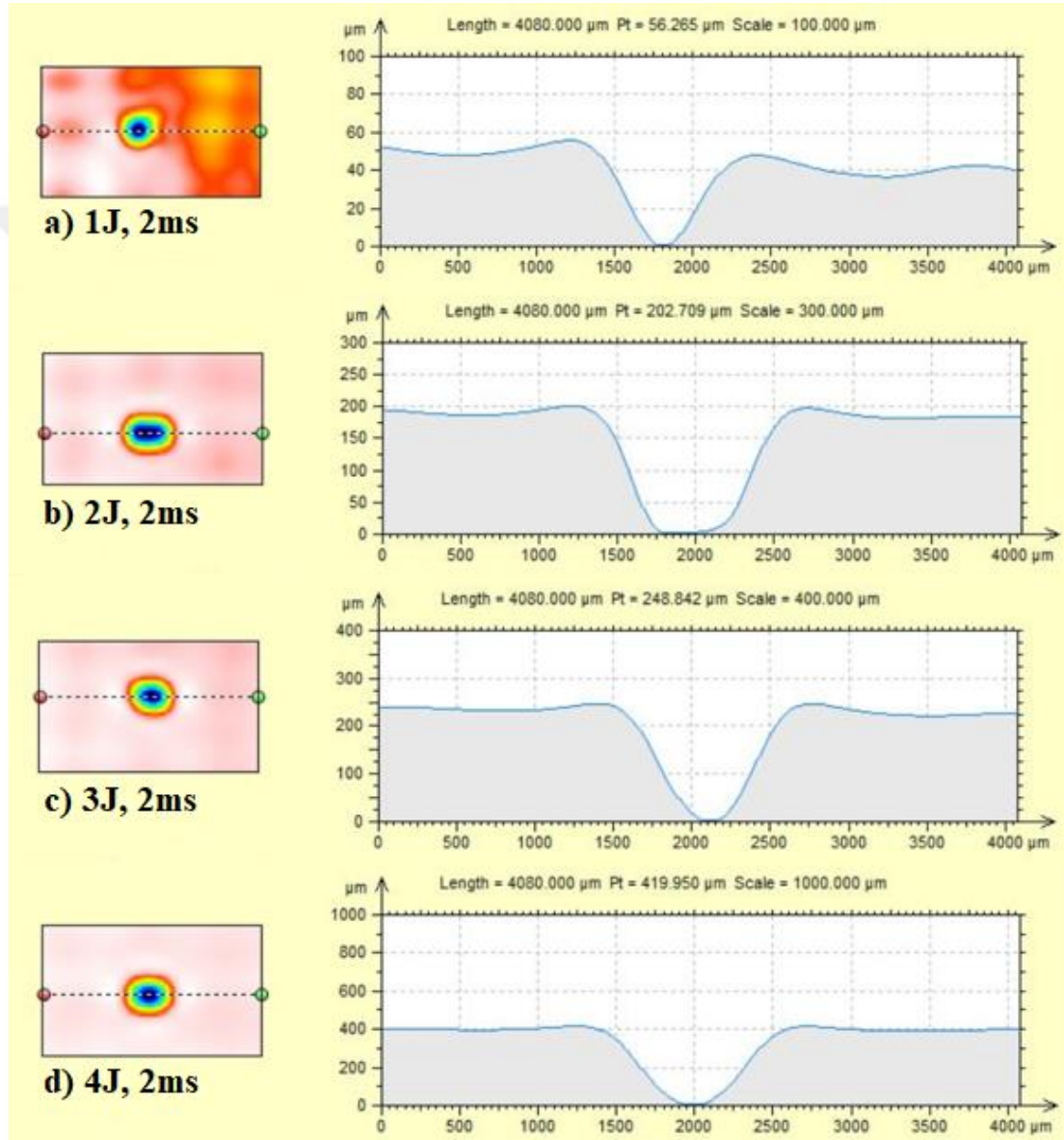
Şekil 4.11. CF - PEEK dairesellik yüzey görüntüsü

Şekil 4.12'de yüzeye sıfır odakta, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının derinlik/çap oranı üzerindeki etkisi görülmektedir. Deneysel sapmalar göz ardı edildiğinde, lazer ablasyonu sonucu elde edilen derinliğin elde edilen çapa olan oranı, lazerin enerji yoğunluğundaki artışla birlikte lineer bir şekilde artış göstermektedir.



Şekil 4.12. CF - PEEK derinlik/çap oranı grafiği

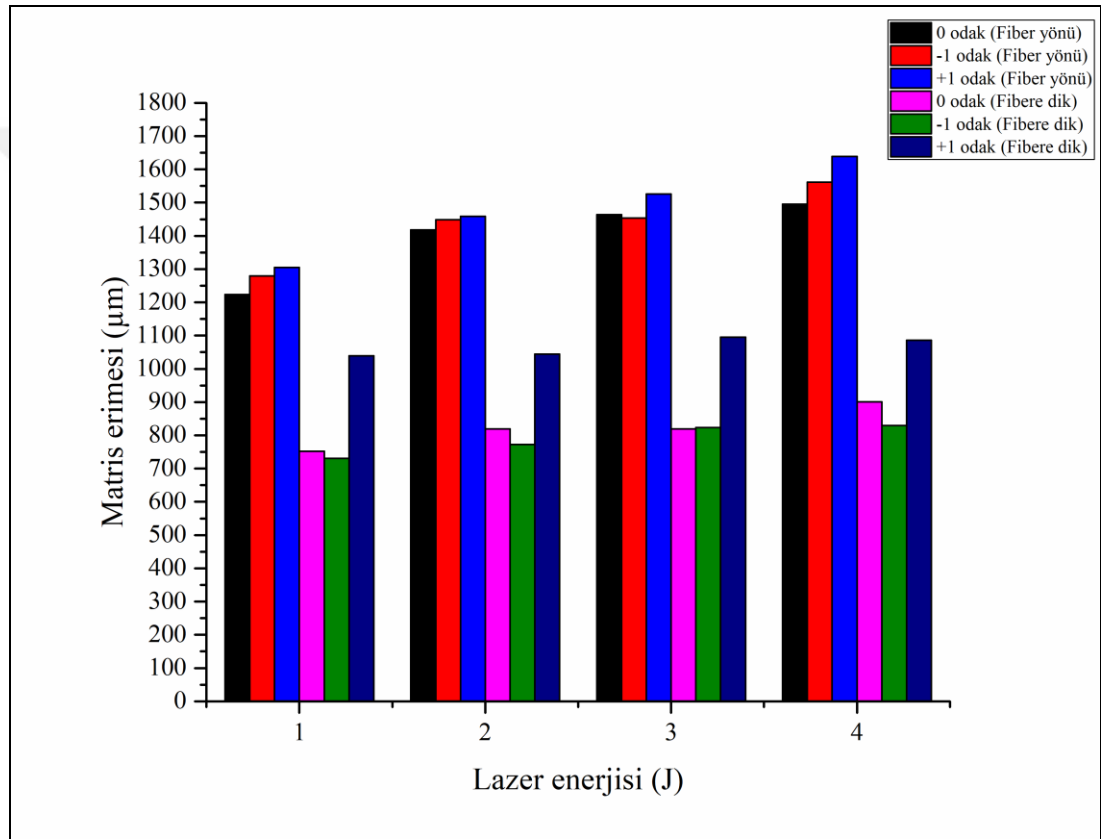
Termal ablasyon ile malzeme çıkarımı üniform bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 4.13'te tez çalışması kapsamında çalışılan en düşük atım süresi değeri olan 2 ms altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J, 4 J lazer enerjisi değerlerinde lazer yoğunluğuna maruz kalmış yüzeylerin optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri verilmiştir. Aynı zamanda düşük atım sürelerinde lazer enerjisinin radyal yönde daha fazla iletilmesi sonucu daha küçük çaplarda daha derin çukurlar elde edilmektedir.



Şekil 4.13. CF - PEEK derinlik/çap oranı kesit görüntüsü

Mevcut bölüm başlığının bu aşamasına kadar olan sonuçlar, odak derinliği yüzeye sıfır sabit şekildeyken incelenmiştir. Bu aşamada ise lazerin odaklandığı noktanın malzemenin yüzeyine olan dikey yöndeki uzaklığının değişiminin işlem kalitesine olan etkisi incelenecektir.

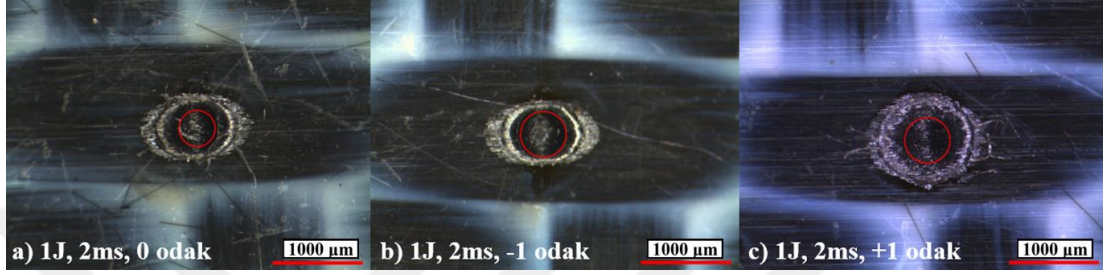
Şekil 4.14'te sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin matris erimesi üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.14. CF – PEEK odak farkı matris erimesi grafiği

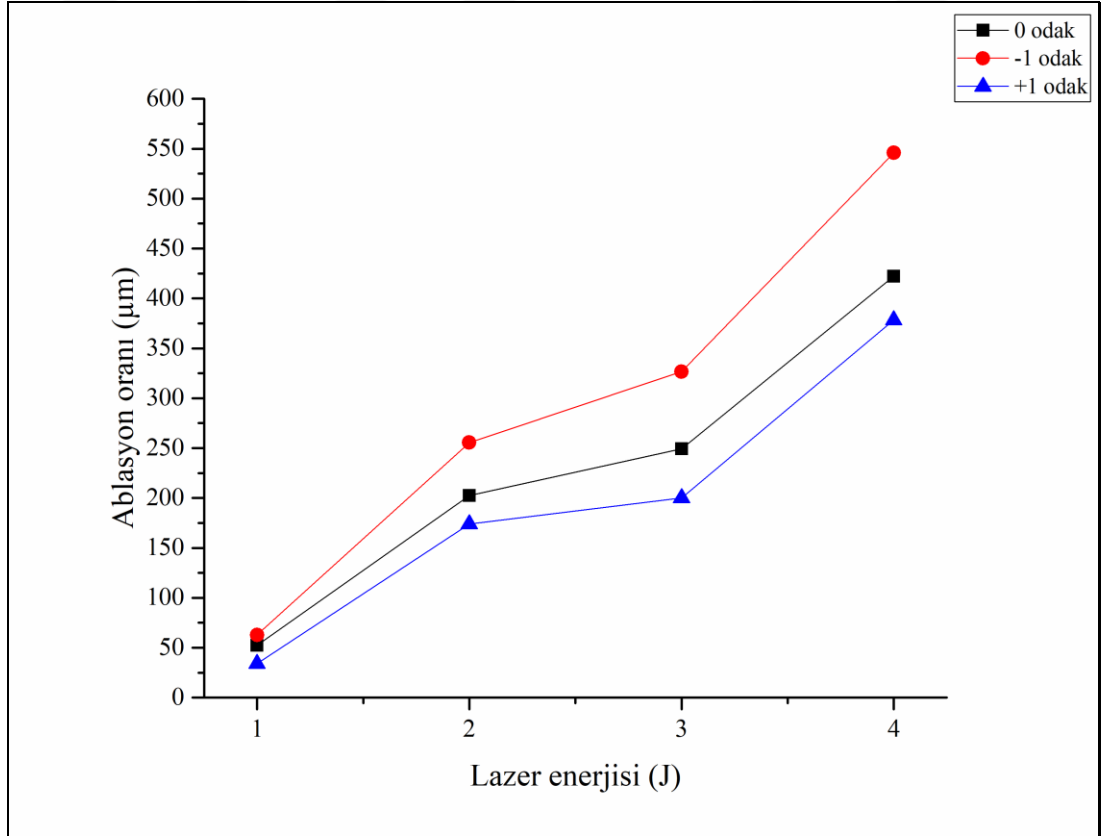
Aynı lazer enerjisi değerinde, lazer ışını yüzeyin 1 mm üzerine odaklandığında, hem fiber yönünde hem fibere dik yönde yüzeydeki matris erimesinin daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni yakınsanan lazer ışını tek bir noktada toplandıktan sonra tekrar yayılarak malzeme üzerine yönlendirilmesidir. Bunun sonucunda tarama çapı da artmaktadır. Aynı tarama çapına sahip yüzey altı odakta ise lazer ışını malzemeye hala yakınsanır bir biçimde geldiğinden dolayı matriste daha az bozunmaya sebep olmuştur. Fibere dik yönde yüzeye odakla hemen hemen yakın değerlere sahip olmasına karşın fiber yönündeki ısı iletimi yüzey altı odakta daha fazla

olup yüzeyde daha yüksek miktarda erimeye sebebiyet vermiştir. Şekil 4.15’te çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük enerji ve en düşük atım süresi olan 1 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri görülmektedir. Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiş olup, lazer ablasyonu yüzey odağında 400 µm odak çapıyla, yüzey altı ve yüzey üstü 1 mm odaklarında ise 500 µm odak çapıyla gerçekleştirilmiştir.



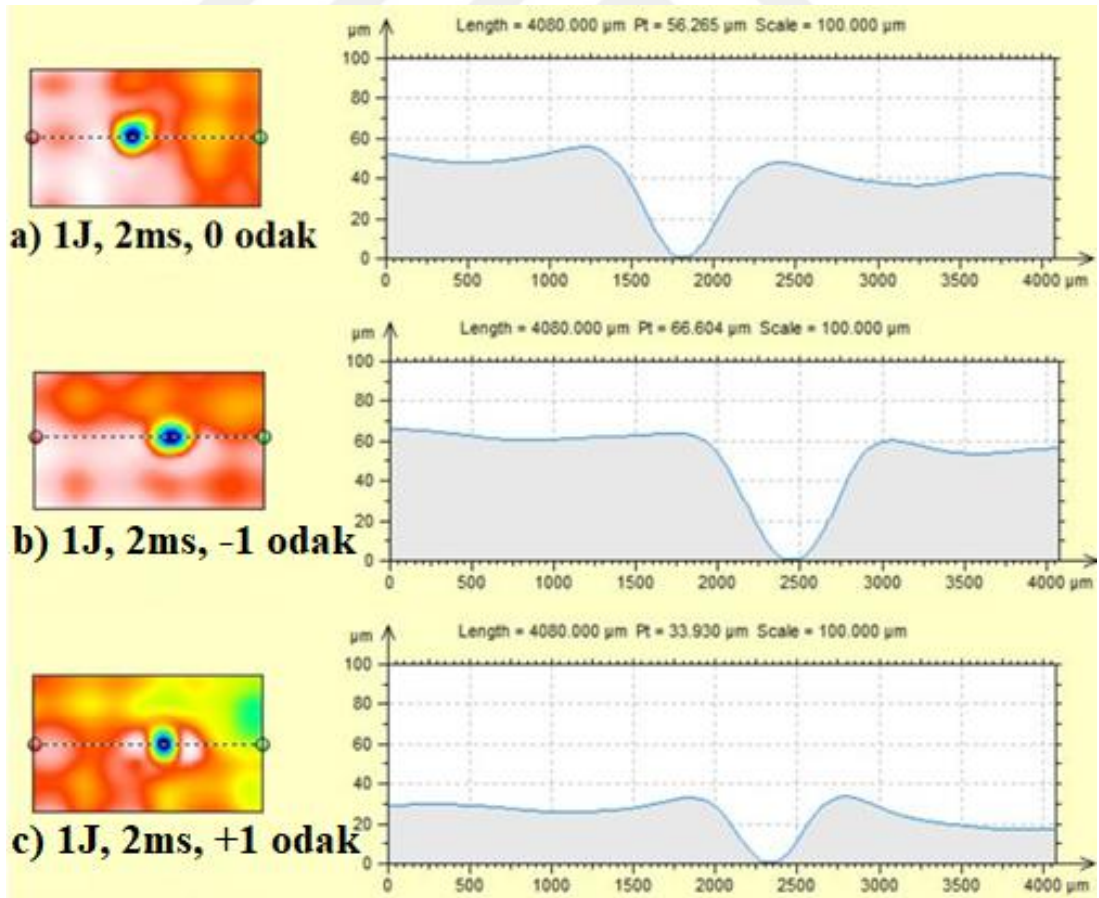
Şekil 4.15. CF – PEEK odak farkı matris erimesi yüzey görüntüsü

Şekil 4.16’da sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin ablasyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;



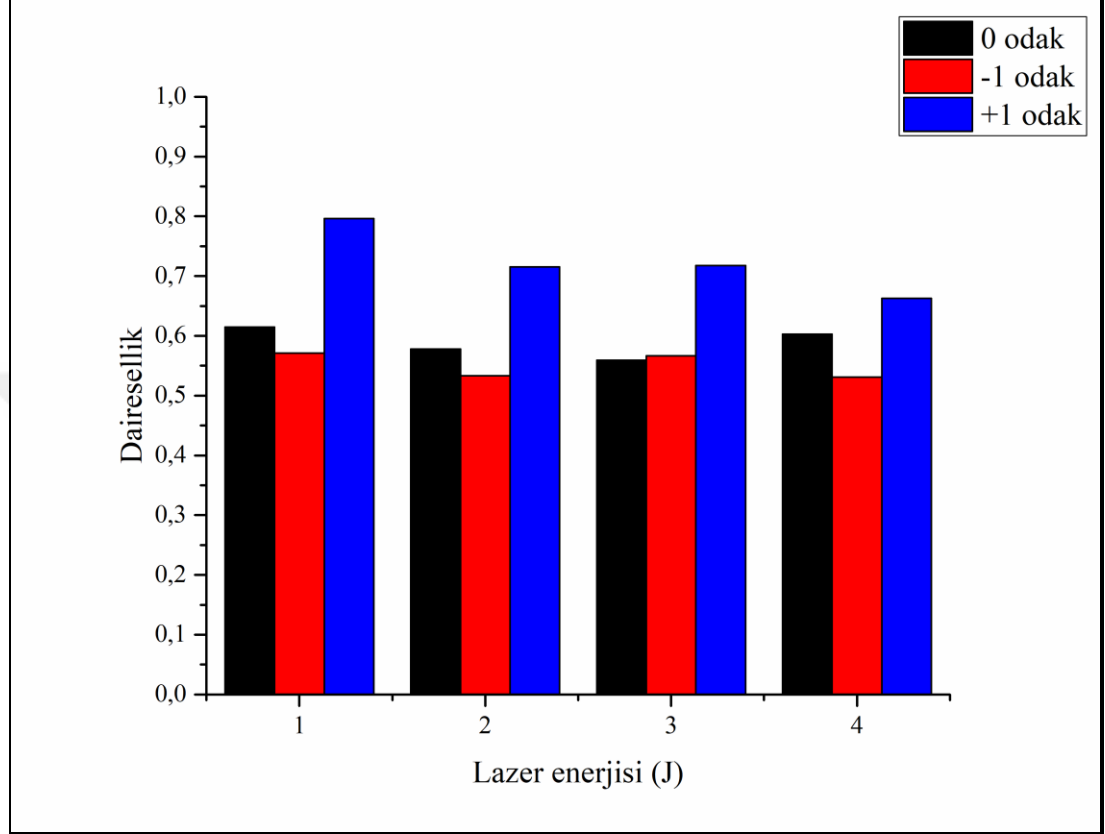
Şekil 4.16. CF – PEEK odak farkı ablasyon oranı grafiği

Ablasyon oranı, matris erimesi değerlerinin aksine, aynı lazer enerjisi değerlerinde lazer ışını yüzeyin 1 mm altına odaklanıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüzey altı odağında lazerin enerjisi yüzeyde matris erimesine değil derinlik boyunca ablasyon oranında artışına sebep olmaktadır. Yüzey üstü odağında ise ablasyon oranı en düşük, matris erimesi en yüksek seviyededir. Aynı tarama alanına sahip yüzey altı ve yüzey üstü odaklarında yüzey altı odağı ile daha yüksek yüzey kalitesi elde edilmektedir. Yüzey odağı ise yüzey üstüne istinaden daha yüksek ablasyon oranı, daha düşük matris erimesi yani daha kaliteli yüzey eldesi sunmaktadır. Sabit atım süresinde lazer enerjisindeki artış aralarındaki ablasyon oranı farkını da arttırmaktadır. 1 J'de birbirlerine yakın değerler gözlemlenmesine rağmen 4 J'de yüzey altındaki ablasyon oranı diğerlerine göre ciddi bir fark göstermektedir. Şekil 4.17'de çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük enerji ve en düşük atım süresi olan 1 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.17. CF – PEEK odak farkı ablasyon oranı kesit görüntüsü

Şekil 4.18’de sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir;

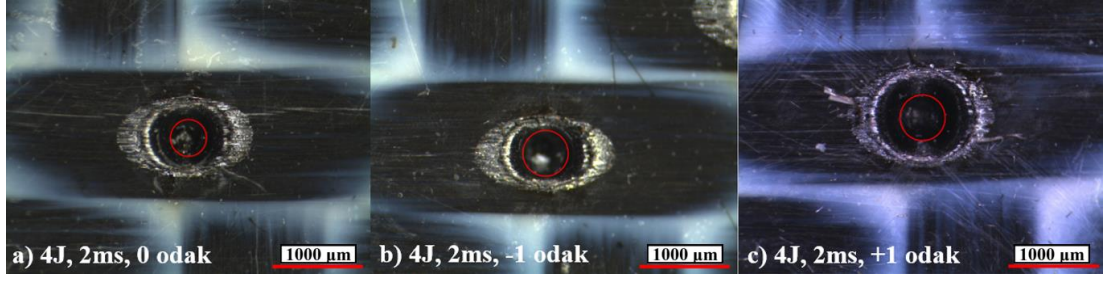


Şekil 4.18. CF – PEEK odak farkı dairesellik grafiği

Aynı enerji yoğunluğu değerlerinde, yüzey üstü odakta fiber yönüne dik yöndeki olan erime yüzey altı ve yüzey odağı ile kıyaslandığında çok daha yüksektir. Bu da yüzey dokusunda daha yüksek daireselliğe neden olacaktır. Yüzey üstü odakta daireselliğin 1 değerine daha yakın olduğu gözlenirken diğer iki odak mesafesinde dairesellikten uzak, eliptik bir yapı görülmektedir.

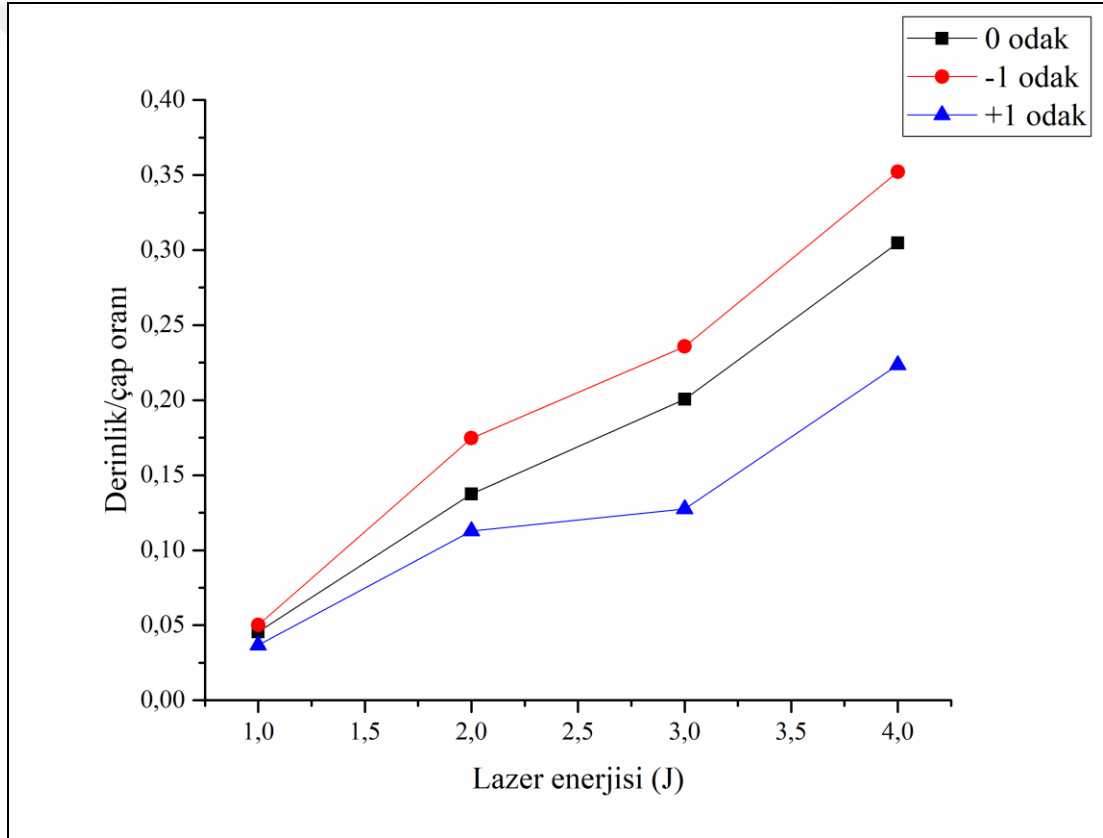
Şekil 4.19’da çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en yüksek enerji ve en düşük atım süresi olan 4 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri görülmektedir. Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiş olup, lazer ablasyonu yüzey odağında 400 µm odak çapıyla, yüzey altı ve yüzey üstü 1 mm odaklarında ise 500 µm odak çapıyla gerçekleştirilmiştir. Yüzeyin 1 mm üzerindeki odaktaki dairesel geometri açıkça seçilebilmektedir.





Şekil 4.19. CF – PEEK odak farkı dairesellik yüzey görüntüsü

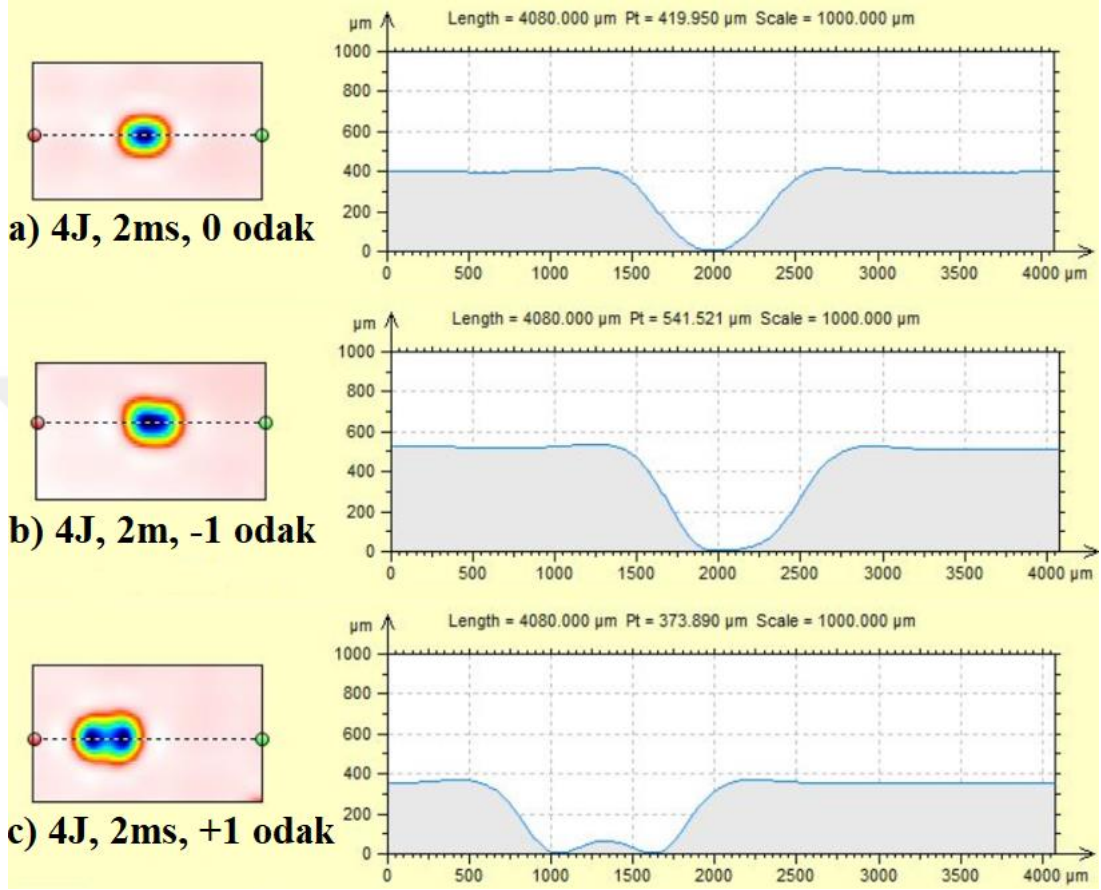
Şekil 4.20’de sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin derinlik/çap oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.20. CF – PEEK odak farkı derinlik/çap oranı grafiği

Ablasyon oranına benzer bir grafik açığa çıkmıştır. Derinlik/çap oranının yüzey altında en yüksek seviyede, yüzey üstünde ise en düşük seviyede olduğu gözlemlenmektedir. Düşük enerjilerde birbirlerine yakın değerler gösteriyorlarken enerji değerindeki artışla birlikte aralarında fark daha da belirginleşmektedir.

Şekil 4.21’de çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en yüksek enerji ve en düşük atım süresi olan 4 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir;



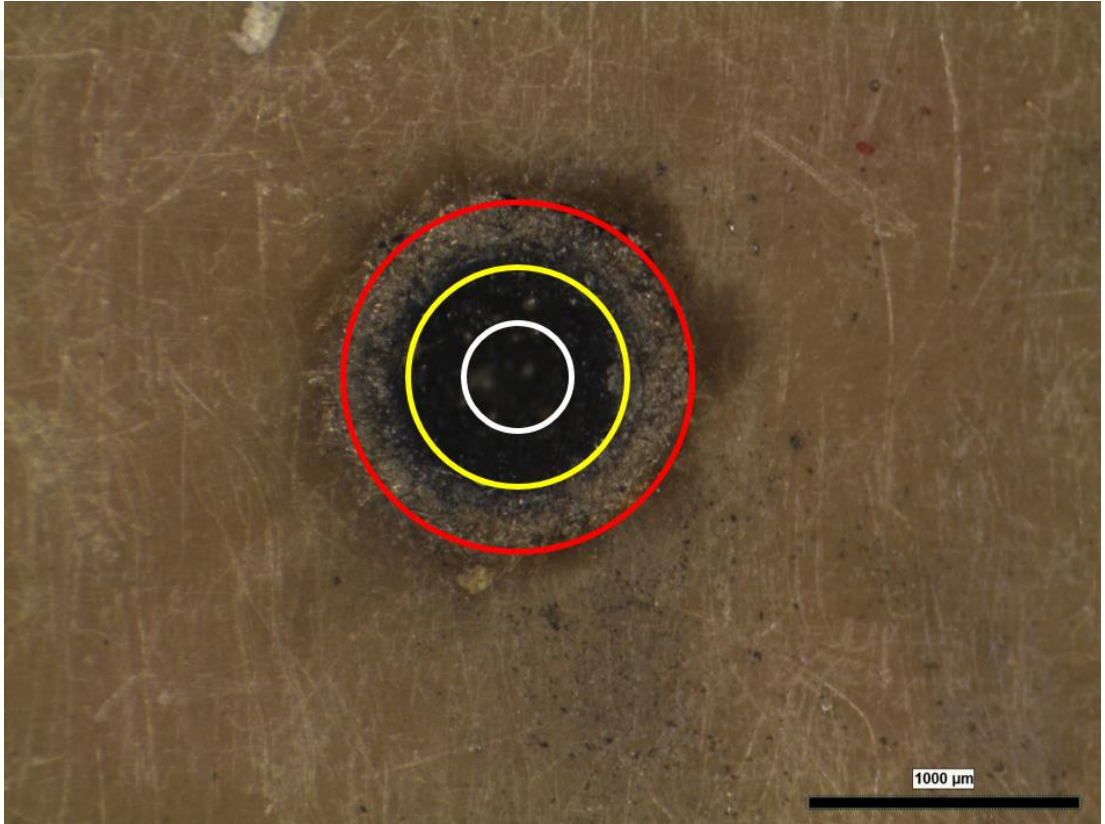
Şekil 4.21. CF – PEEK odak farkı derinlik/çap oranı kesit görüntüsü

Aynı tarama alanına sahip yüzey altı ve yüzey üstü odaklarında, yüzey altı ile daha düşük çaplarda daha yüksek derinlikler elde edilirken yüzey üstünde daha düşük derinliklerde daha geniş yüzey dokuları elde edilebilmektedir. Yüzey odağı ise bu iki odak türünün arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, daha yüksek ablasyon oranları ve derinlik/çap oranları için yüzey altı odağı ile çalışılması gerekmektedir. Daha düşük derinlik/çap oranları ve daha dairesel yapılar için ise yüzey üstü odağı tercih edilmelidir. Yüzey odağında ise yakınsanan lazer ışını mümkün olan en düşük odak alanında toplandığı için daha yüksek lazer yoğunluğu elde edilir.

#### 4.2. Cam Fiber Takviyeli Polifenilen sülfid Yüzey Dokusu Deneysel Çalışmaları

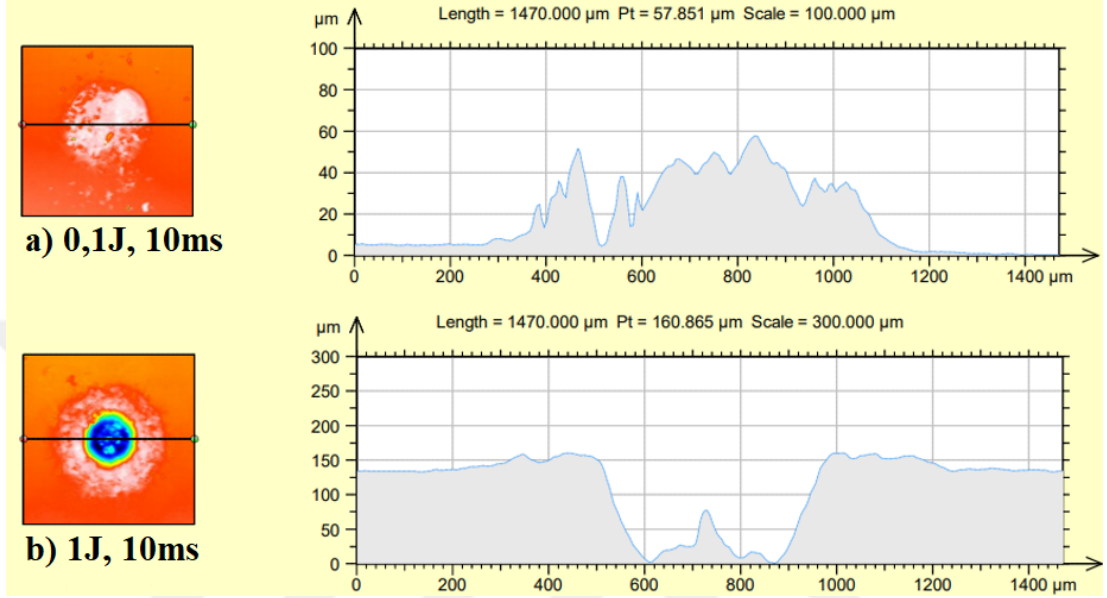
GF - PPS yüzeyine gönderilen yüksek enerji yoğunluğuna sahip lazer ışınının malzeme ile termal etkileşimi sonucunda oluşan yüzeyin yapısı Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Odak alanı beyaz daire ile işaretlenmiş olup bu bölgede sıcaklık maksimum değerdedir. Hem polimer matrisin hem de cam fiberlerin buharlaştığı gözlemlenmektedir. Odak noktası alanı sınırlarından uzaklaştıkça sıcaklık değeri azalmaktadır. Sarı daire ile sınırlandırılan bölgede buharlaşma bölgesi, kırmızı daire ile sınırları belirtilmiş alan ise matris erimesi bölgesidir.



Şekil 4.22. GF - PPS termal etkileşim kategorizasyonu

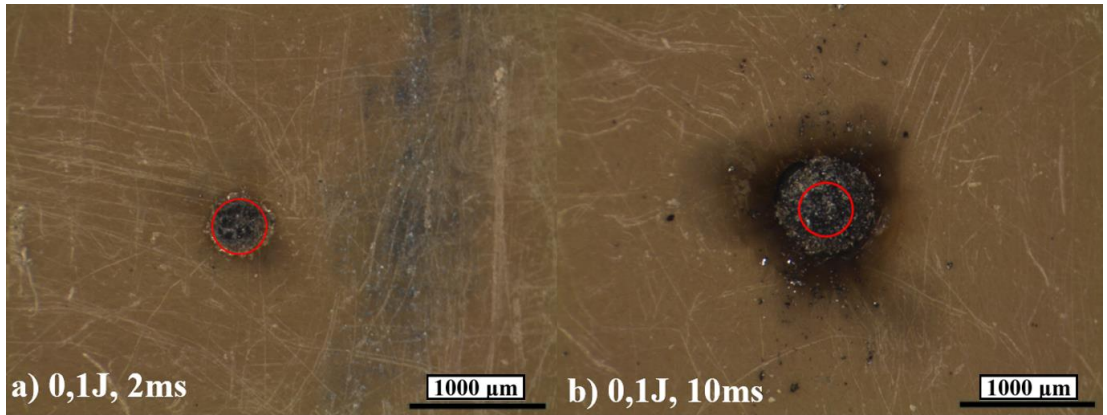
0,1 J enerji değerine sahip lazer atımlarında ( $79,57 \text{ J/cm}^2$ ) yeterli enerji yoğunluğu elde edilemediğinden dolayı oluşan yüzey dokusu çukur şeklinde oluşmamıştır. Yüzeyde kabartılar meydana gelmiştir. Mevcut enerji yoğunluğu termal genleşmeler meydana getirip malzeme içerisinde boşluk oluşturmuş, bir yükselti meydana getirmiş fakat malzeme çıkarımını ve çukur oluşumunu gerçekleştirecek kadar yeterli olamamıştır. Himmelbauer ve arkadaşları ablyasyonun lazer enerjisinin eşik değerini geçtikten sonra gerçekleşmeye başladığını ve bu eşğin atım süresi ile azaldığını

bildirdiler [37]. Çalışma kapsamında çalışılan en düşük enerji yoğunluğu ( $79,57 \text{ J/cm}^2$ ) ile sonraki değere ( $795,77 \text{ J/cm}^2$ ) maruz kalmış yüzeyin 10 ms atım süresine ait kesit görüntüleri Şekil 4.23'te verilmiştir. Lazer enerjisi yeterli eşik değerini sağladıktan sonra yüzey dokusunun çukur şeklinde oluştuğu görülmektedir.



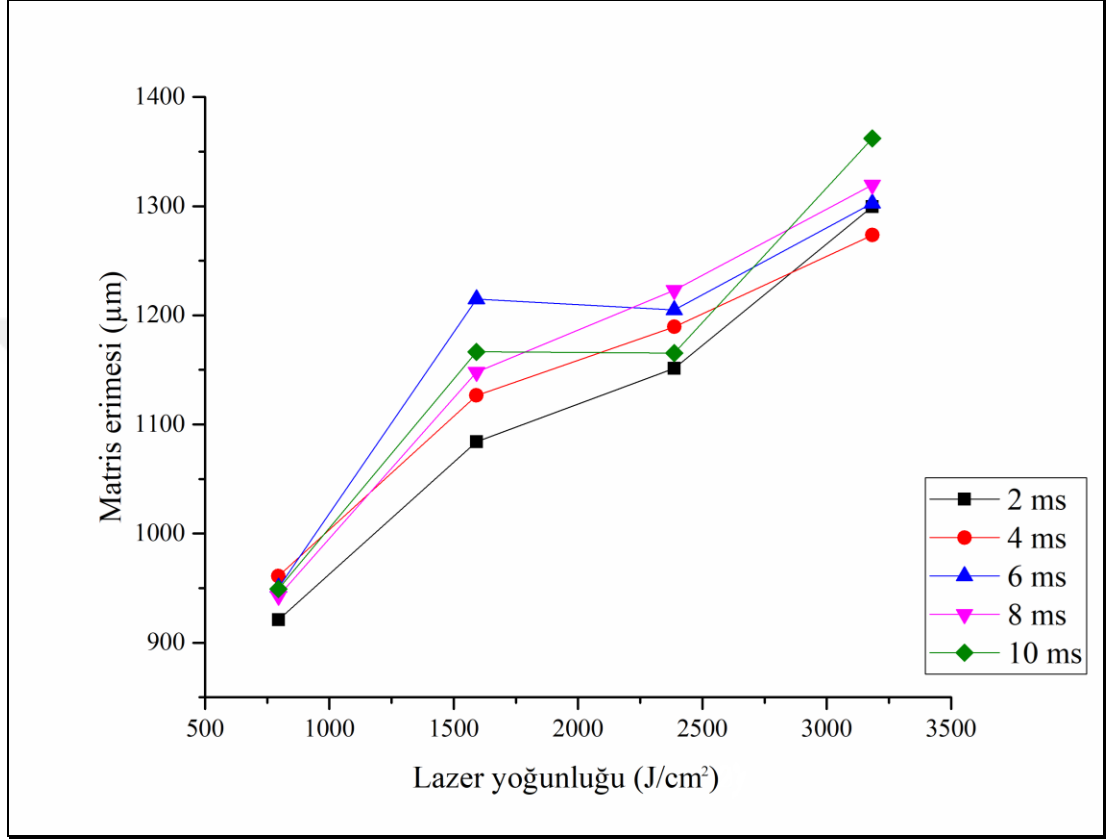
Şekil 4.23. Ablasyon sonucu oluşan kabartıların kesit görüntüsü

Şekil 4.24'te yeterli enerji yoğunluğunun sağlanamaması sonucu oluşan kabartıların çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük ve en yüksek atım süresi değeri olan 2 ms ve 10 ms altındaki yüzey yapıları görülmektedir. Atım süresindeki artışla birlikte yüzeydeki matris erimesinin arttığı ve termal bozunmalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.24. Kabartıların yüzeydeki matris erimesi

Lazer enerji yoğunluğu gereken eşik seviyeyi aşıttan sonra lazer ablasyonu sonucu yüzeyde çukur yapıları oluşmuştur. Şekil 4.25'te yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının yüzeydeki matris erimesi üzerindeki etkisi görülmektedir;

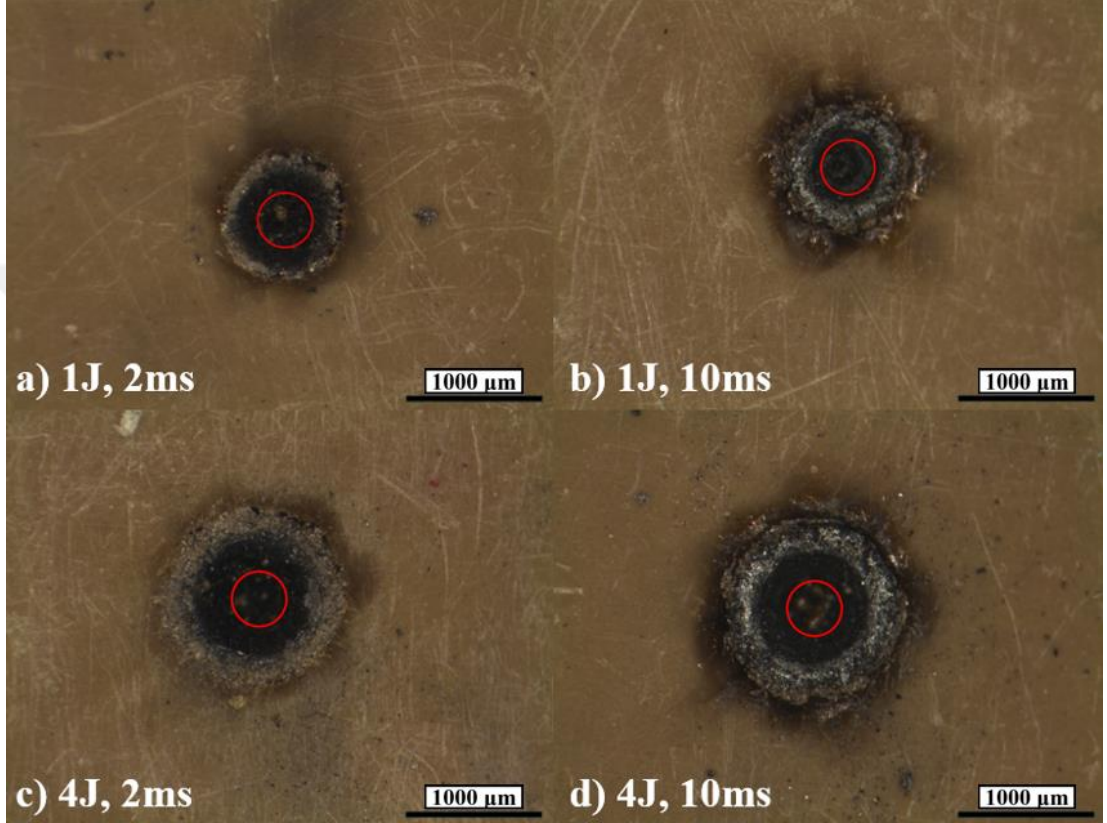


Şekil 4.25. GF - PSS matris erimesi grafiği

Yüzeydeki matris erimesinin dairesel bir geometriye yakın olmasından ve malzemenin izotropik bir özellik göstermesinden dolayı matris erimesi yüzeydeki maksimum erime ile minimum erimenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Deneysel sapmalar göz ardı edildiğinde, lazer yoğunluğu arttıkça yüzeydeki matris erimesinin doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Düşük atım sürelerinde yüzeydeki matris erimesi daha düşük seviyelerde seyretmektedir.

Şekil 4.26'da matris erimesi grafiğindeki uç değerlere karşılık gelen lazer parametrelerine ait matris erimelerinin yüzey görüntüleri verilmiştir. Matrisin çukurların çevresindeki bir bölgede eridiği ve buharlaştığı görülmektedir. Isıdan etkilenen bölgenin mümkün olan en düşük seviyede olması gerekmektedir. Aksi durumda malzemenin statik ve dinamik özellikleri zayıflamaktadır. Aynı lazer

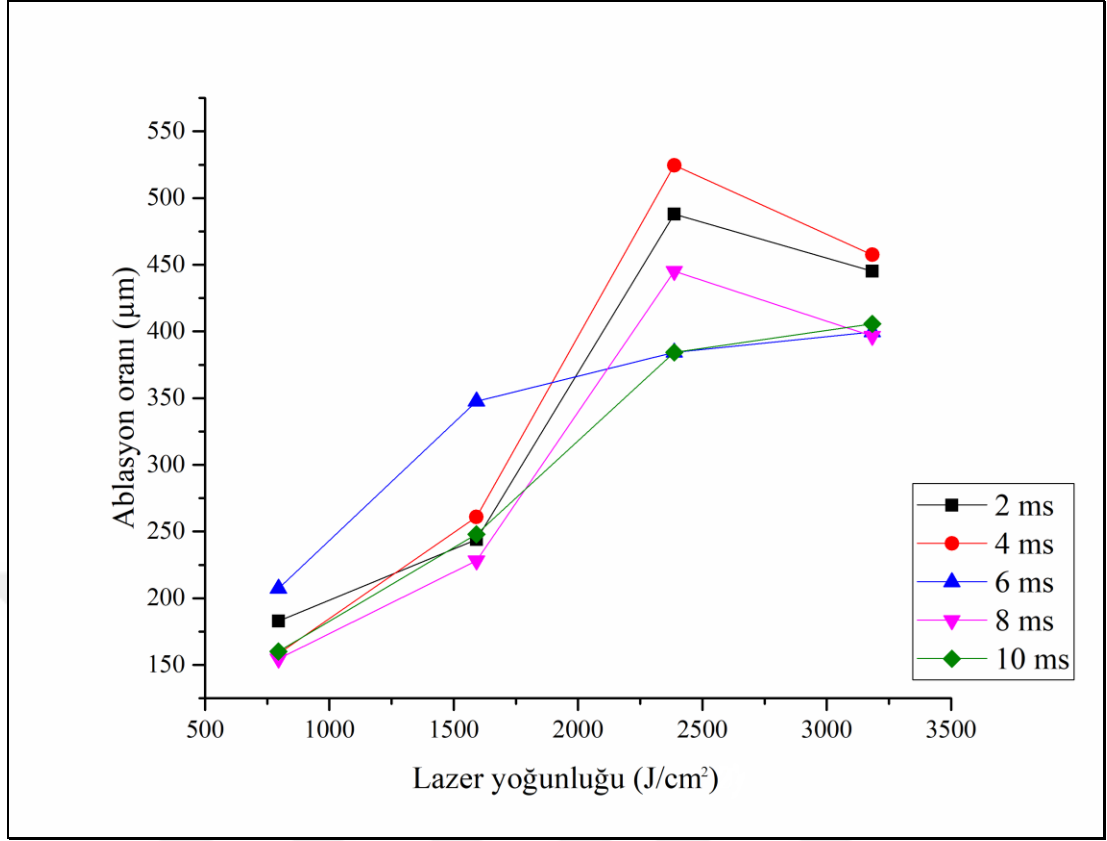
yoğunluğu değerlerinde, kısa atım süresinde malzeme lazerin enerjisini daha iyi emdiğinden dolayı yüzeydeki termal bozunmalar daha az olmuştur ve daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir. Artan enerji yoğunluğuyla da daha geniş ve derin çukurlar elde edileceğinden dolayı matris erimesindeki artış kaçınılmazdır fakat parametre optimizasyonu ile minimize edilebilir.



Şekil 4.26. GF - PPS matris erimesi yüzey görüntüsü

Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiştir. Isının bu alan çevresince eşit miktarda yayıldığı ve yüzeyde dairesel yapıda bir geometrinin oluştuğu görülmektedir. Dairesellik malzemelerin tribolojik performansını etkileyen önemli özelliklerden biridir.

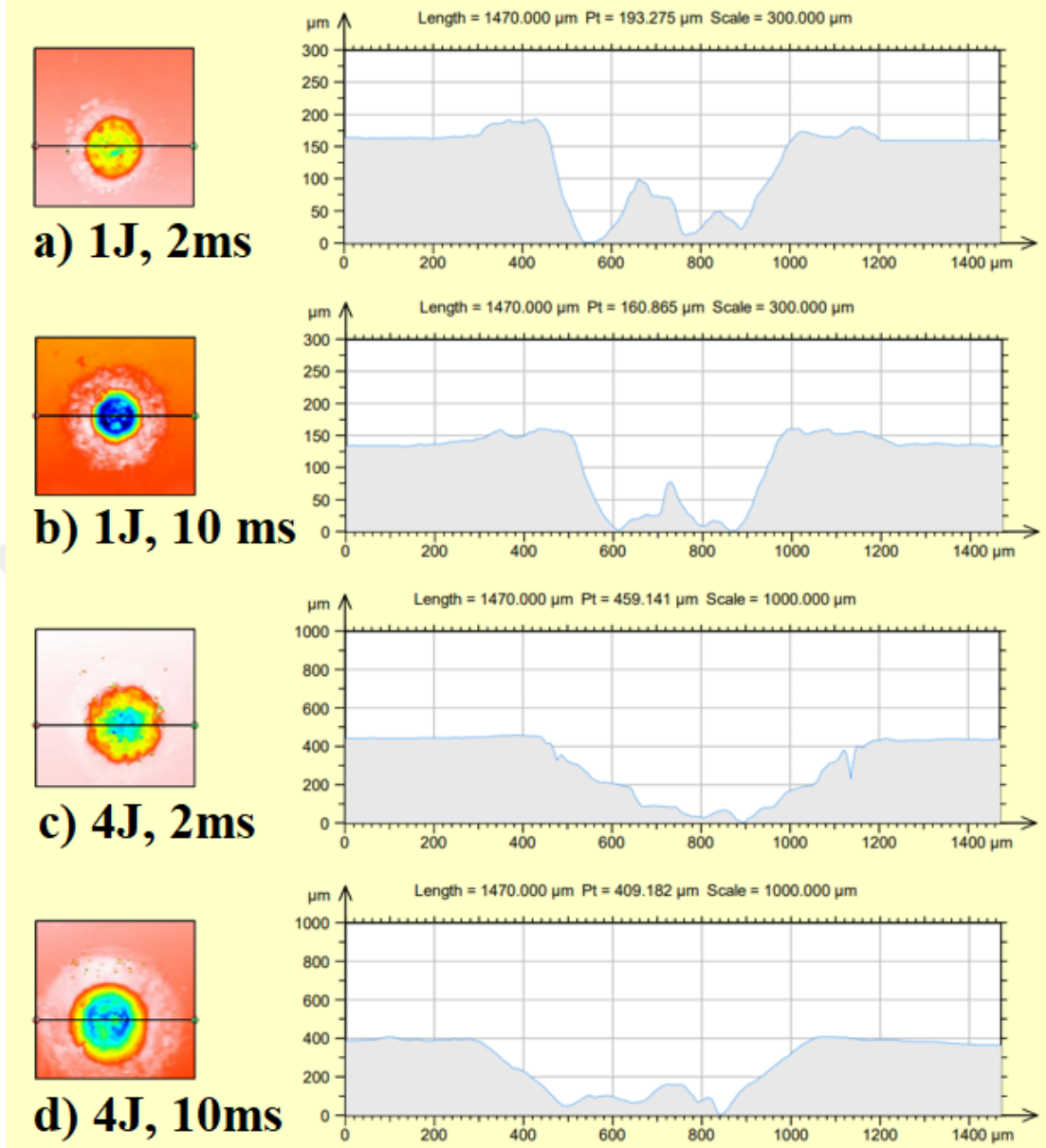
Lazer ile malzeme etkileşimi sonucunda yüzeyde termal gerilmeler ve hızlı bir buharlaşmanın sonucunda termal ablyasyon ile malzeme çıkarımı gerçekleşmiştir. Şekil 4.27’de yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının ablyasyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.27. GF - PPS ablasyon oranı grafiği

Ablasyon oranı bir lazer atımı ile elde edilen derinliktir. Lazer yoğunluğundaki artışla birlikte artış göstermektedir. Artan lazer yoğunluğuyla birlikte daha derin ve daha geniş çukurlar elde edilmesinin yanı sıra yüksek yoğunluk termal bozulmalara sebep olur. Düşük atım sürelerinde çalışılması durumunda daha kaliteli yüzeyler oluşmasının yanı sıra aynı zamanda daha derin çukurlar elde edilir.

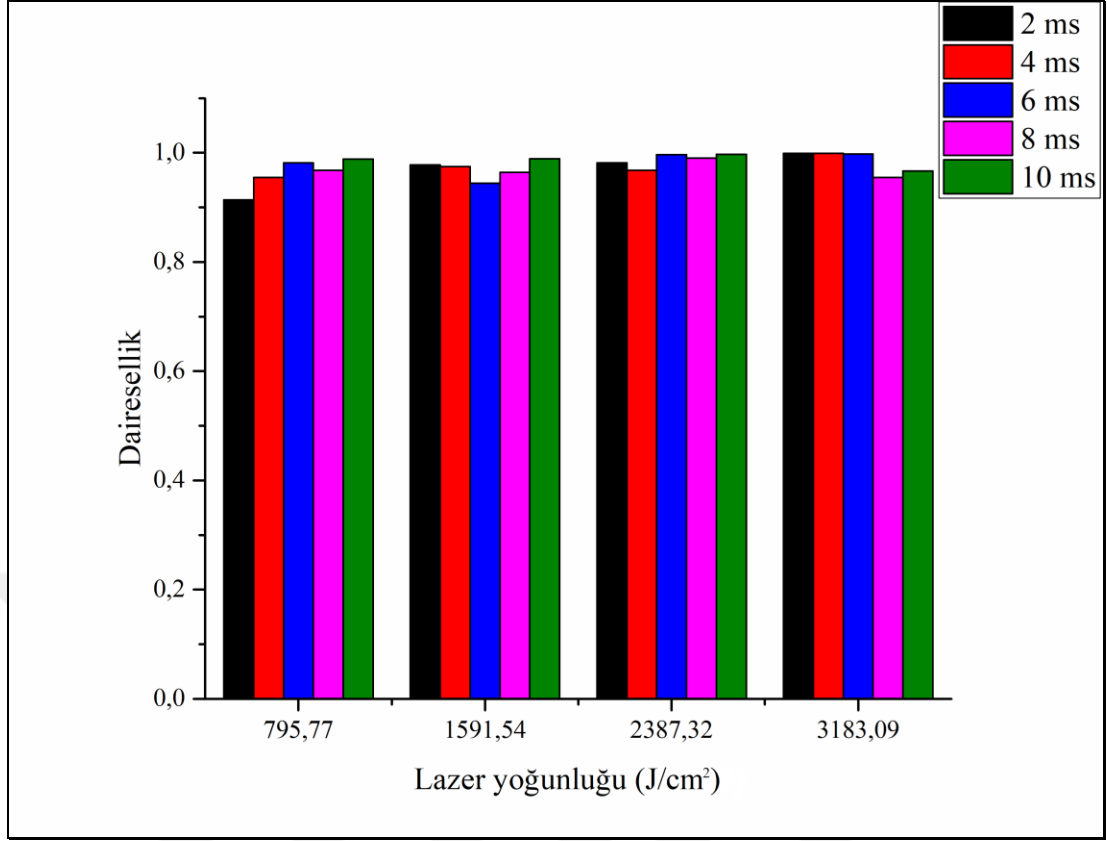
Şekil 4.28’de ablasyon oranı grafiğindeki uç değerlere karşılık gelen lazer parametrelerine ait çukur dokularının optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir. Ablasyon sonucunda açısız bir yapıda yüzey morfolojisi meydana gelmiştir. Verilen yüzey morfolojileri incelendiği zaman aynı enerji yoğunluğu değerinde atım süresi artınca derinliğin azaldığı görülmektedir. Enerji yoğunluğundaki artışla ve atım süresindeki azalışla beraber çukurların dip kısmında yeniden katılma sebebiyle olan düzensizliklerin de azaldığı görülmektedir. 4 J enerji ve 2 ms atım süresinde malzeme çıkarımı en düzenli şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.28. GF - PPS ablasyon oranı kesit görüntüsü

Şekil 4.29'da yüzeye sıfır odakta, 400 μm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir. Dairesellik, yüzeydeki erime sonucu oluşan yapının minimum çapının maksimum çapına olan oranıdır. Cam fiber takviyesi PPS polimerine kısa fiber ve rastgele yönlendirilmiş şeklinde takviye edildiği için elde edilen kompozit yapı izotropikliğe yakın özellik göstermiştir ve homojen davranmıştır. Lazer enerjisinin yarattığı ısı odak çapının çevresi boyunca eşit bir şekilde iletilmiştir ve yüzeyde daireselliğe yakın geometriler meydana gelmiştir.

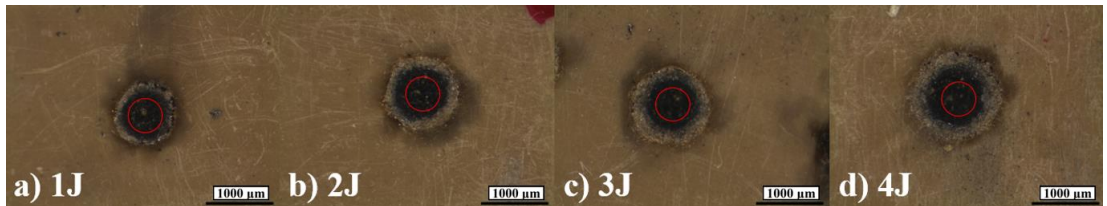




Şekil 4.29. GF - PPS dairesellik grafiği

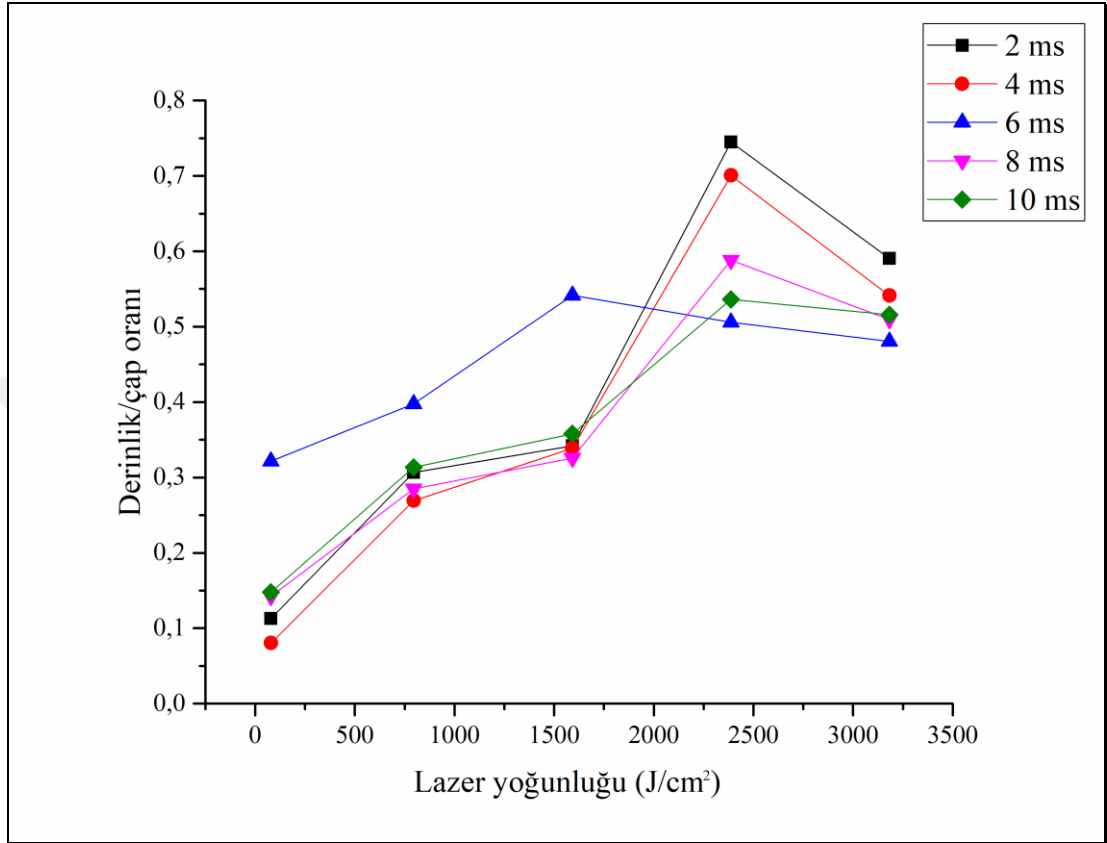
Kaliteli ve hassas bir yüzey dokusu için daireselliğin 1 değerine yakın olması tercih edilmektedir. Kısa fiber takviyeleriyle birlikte malzeme izotropikliğe yakın bir yapı göstermiştir ve sonuçların tümü 1 değerine yakın yani dairesel çıkmıştır.

Şekil 4.30'da tez çalışması kapsamında çalışılan en düşük atım süresi değeri olan 2 ms değeri altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J, 4 J lazer enerjisi değerlerinde lazer yoğunluğuna maruz kalmış yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiber takviyesi sebebiyle yüzeyde oluşan yapıların daireselliği açıkça görülmektedir. Enerji yoğunluğuyla birlikte yüzeydeki matris erimesi ve derinlik artsa dahi dairesel yapı bozulmamıştır.



Şekil 4.30. GF - PPS dairesellik yüzey görüntüsü

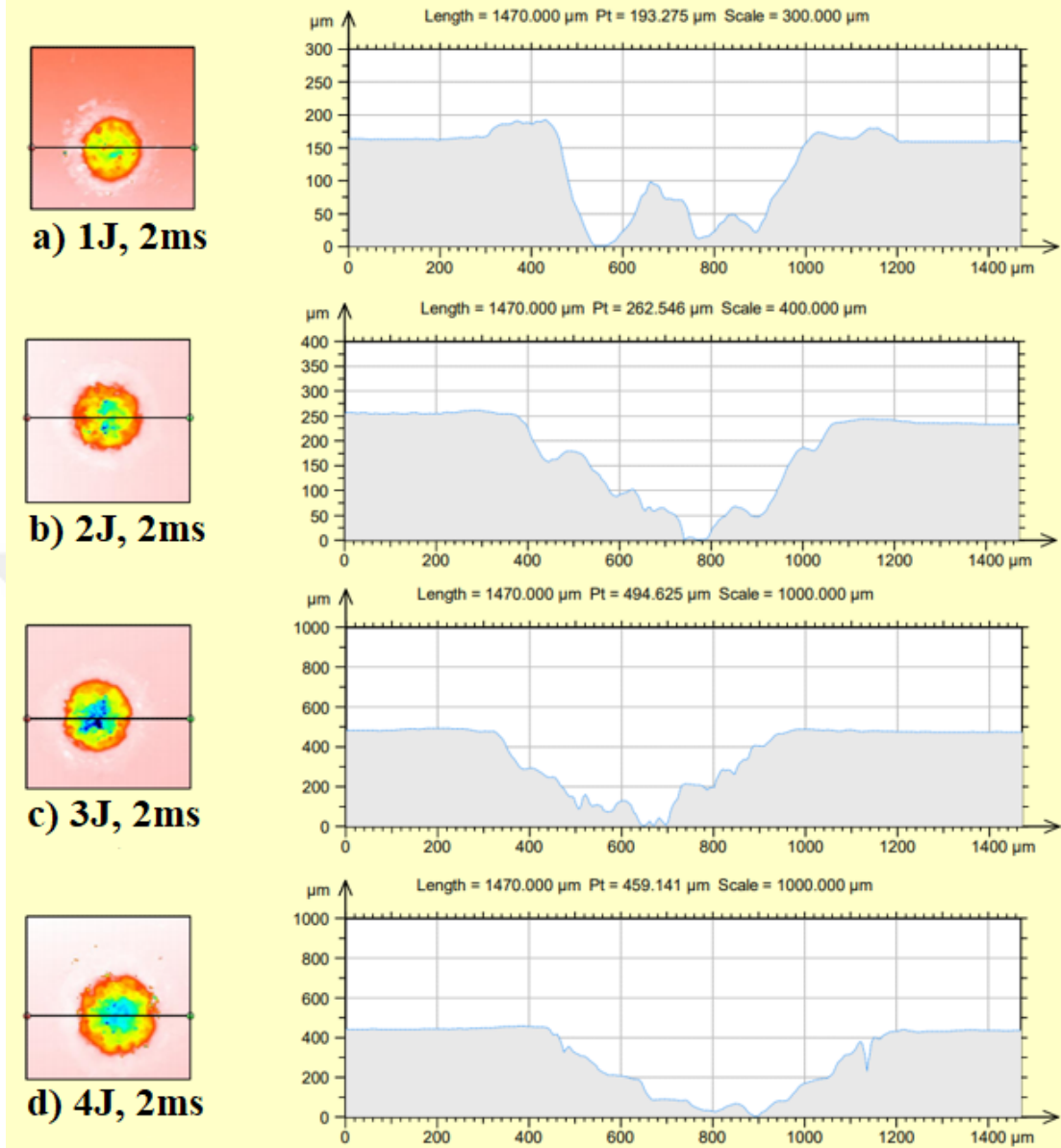
Şekil 4.31’de yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, 5 farklı atım süresi değerinde, lazer enerjisi yoğunluğunun artışının derinlik/çap oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;



4.31. GF - PPS derinlik/çap oranı grafiği

Deneysel sapmalar göz ardı edildiğinde, aynı enerji yoğunluğu değerlerinde en yüksek derinlik/çap oranı en düşük atım süresi değerinde elde edilmektedir. Düşük derinlik/çap oranları içinse yüksek atım sürelerinde çalışılmalıdır. Ayrıca enerji yoğunluğundaki artış derinlik/çap oranını arttırmaktadır. Enerji arttıkça derinlik çapa kıyasla daha çok artmaktadır. Örneğin 2 ms atım süresinde 1 J enerjisine karşılık gelen derinlik/çap oranı yaklaşık olarak 0,3 iken 4 J enerjisinde bu değer yaklaşık olarak 0,6 seviyesine denk gelmektedir. 2 katlık bir artış söz konusudur.

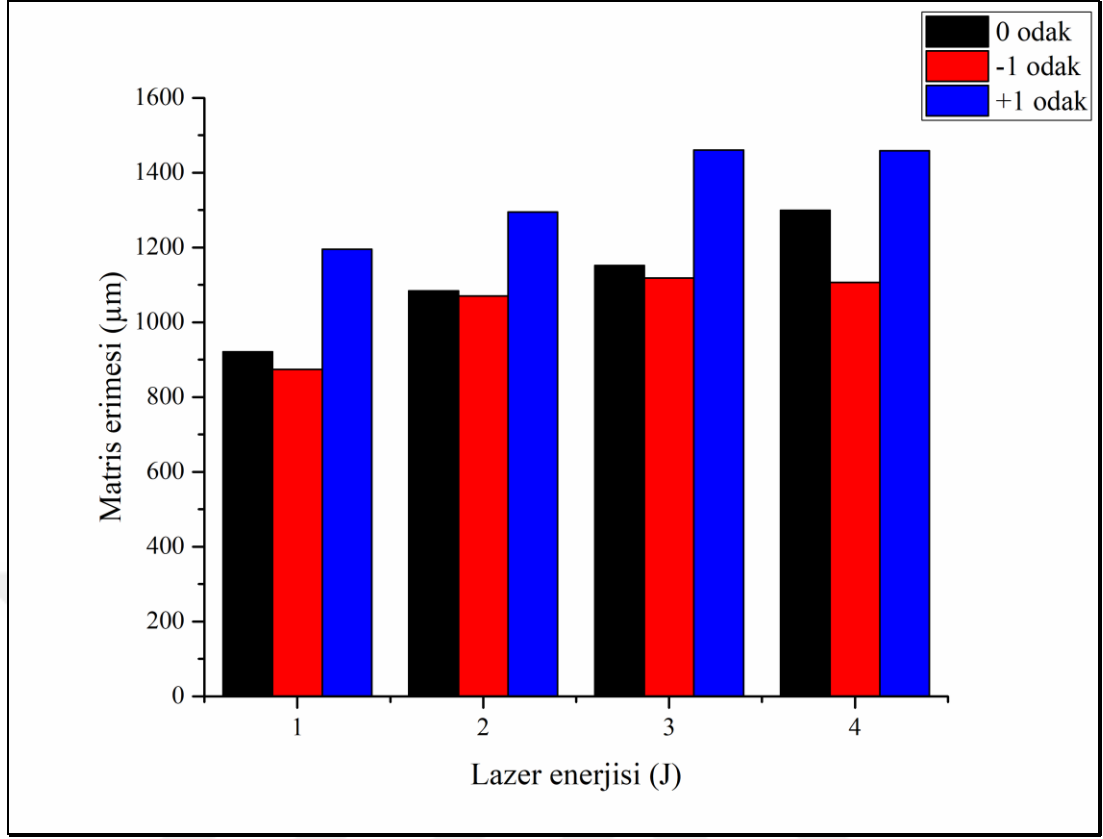
Şekil 4.32’de tez çalışması kapsamında çalışılan en düşük atım süresi olan 2 ms değeri altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J, 4 J lazer enerjisi değerlerinden lazer yoğunluğuna maruz kalmış yüzeylerin optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri verilmiştir;



Şekil 4.32. GF - PPS derinlik/çap oranı kesit görüntüsü

Mevcut bölüm başlığının bu aşamasına kadar olan sonuçlar, odak derinliği yüzeye sıfır sabit şekildeyken incelenmiştir. Bu aşamada ise lazerin odaklandığı noktanın malzemenin yüzeyine olan dikey yöndeki uzaklığının değişiminin işlem kalitesine olan etkisi incelenecektir.

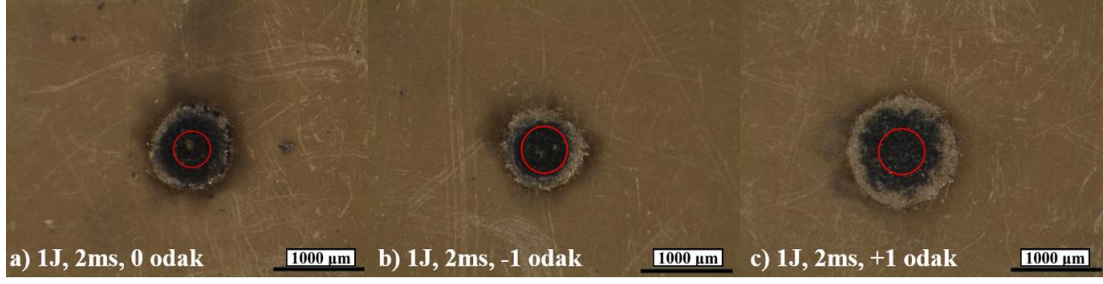
Şekil 4.33'te sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin matris erimesi üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.33. GF - PPS odak farkı matris erimesi grafiği

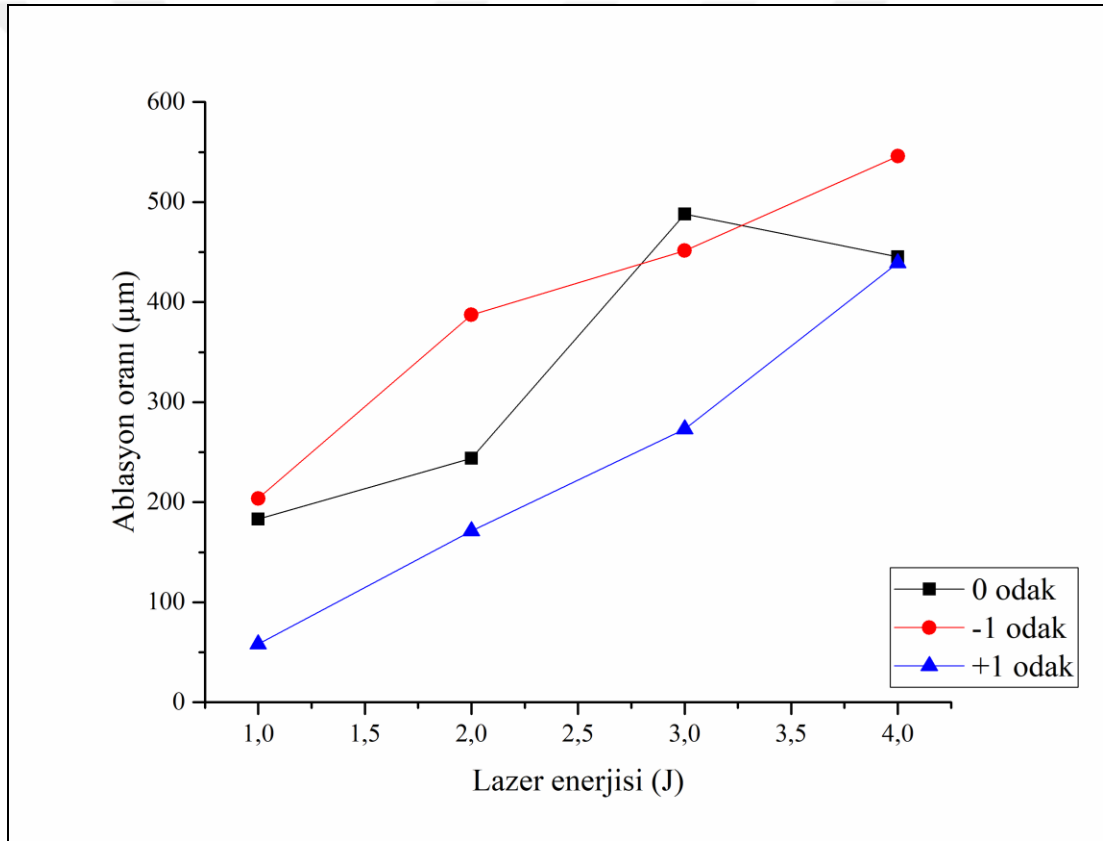
İlgili grafik incelendiğinde, aynı lazer enerjisi değerlerinde matris erimesi yüzey üstü 1 mm odakta en yüksek seviyededir. Odak noktası yüzey üzerinde bir noktaya konumlandırıldığında, yakınsanarak tek bir noktada toplanan lazer ışını malzemeye ulaşmadan önce ıraksanacaktır. Bu durum etkileşim sonucunda yüzey kalitesinde düşüklüğe sebep olmaktadır. Aynı tarama çapında yüzey altı odakta lazer ışını malzemeye yakınsanır bir şekilde etkileşime girdiğinden dolayı matristeki bozunma görece daha az olmuştur.

Şekil 4.34'te çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük enerji ve en düşük atım süresi olan 1 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri görülmektedir. Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiş olup, lazer ablasyonu yüzey odağında 400 µm odak çapıyla, yüzey altı ve yüzey üstü 1 mm odaklarında ise 500 µm odak çapıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.34. GF - PPS odak farkı matris erimesi yüzey görüntüsü

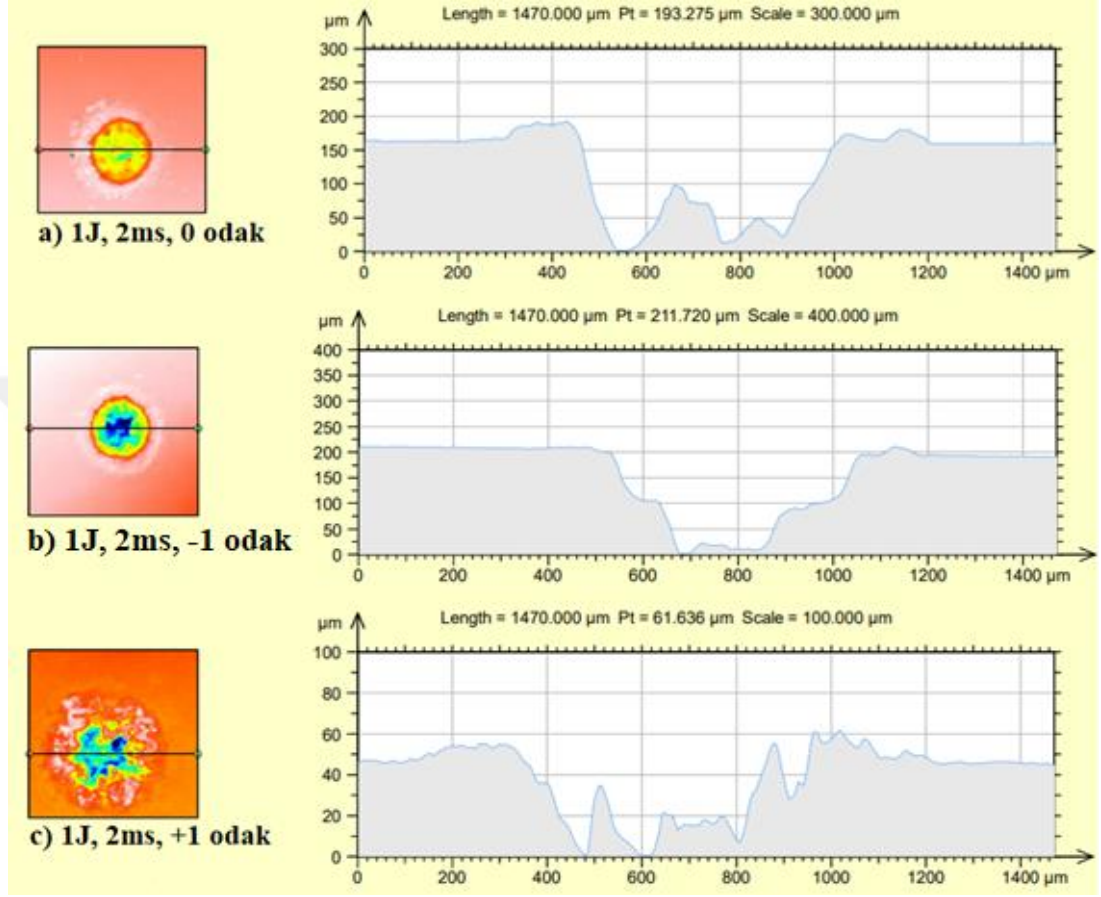
Şekil 4.35'te sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin ablasyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.35. GF - PPS odak farkı ablasyon oranı grafiği

Ablasyon oranı, matris erimesinin aksine yüzey altı odakta daha yüksektir ve daha derin çukurlar elde edilmektedir. Matris erimesinin yüksek olduğu yüzey üstü odağında ise ablasyon oranı en düşük seviyededir. Aynı tarama alanına sahip yüzey altı ve yüzey üstü odaklarında yüzey altı odağı ile daha yüksek kaliteli yüzeyler elde edilmektedir. Ablasyon oranı odak noktasının konumundan bağımsız olarak lazer enerjisiyle birlikte artış göstermektedir.

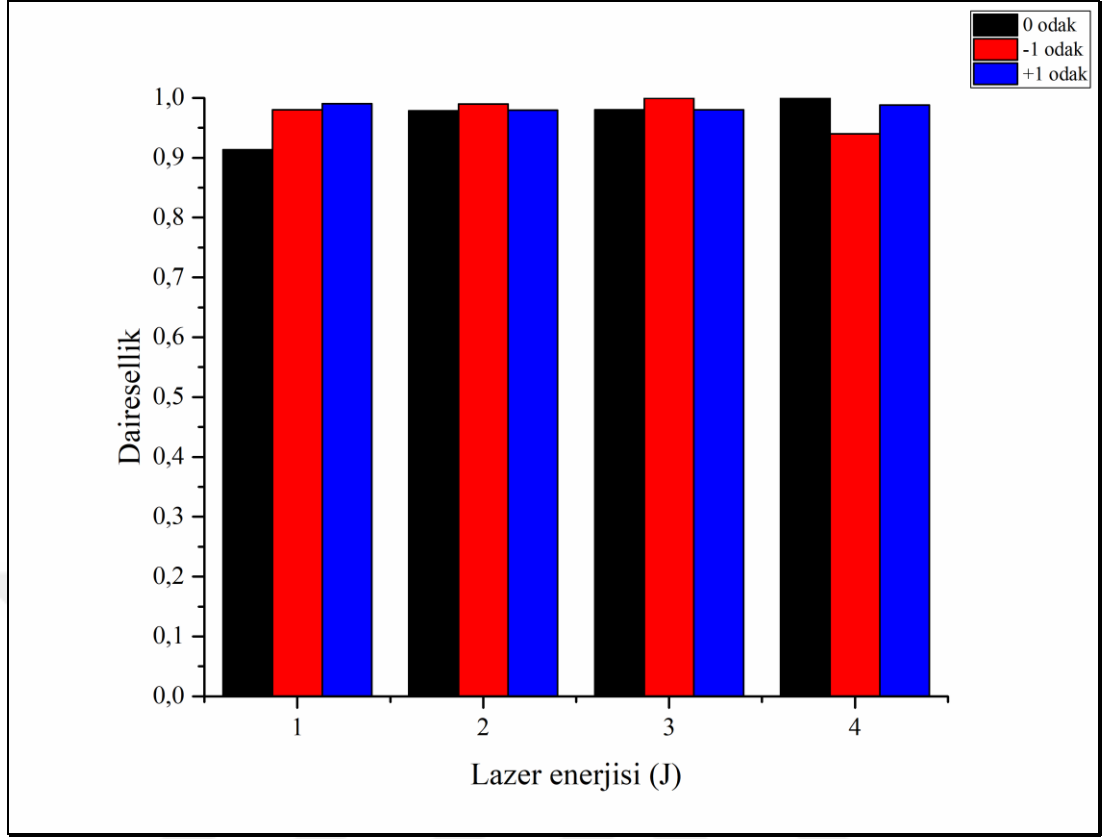
Şekil 4.36’da çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en düşük enerji ve en düşük atım süresi olan 1 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir;



Şekil 4.36. GF - PPS odak farkı ablastyon oranı kesit görüntüsü

Verilen yüzey morfolojileri incelendiğinde aynı lazer enerjisi ve aynı atım süresi değerlerinde oluşturulan bu üç yüzey dokusu arasında en yüksek kaliteli yüzeyin -1 odakta, en düşük kaliteli yüzeyin ise +1 odakta olduğu görülmektedir.

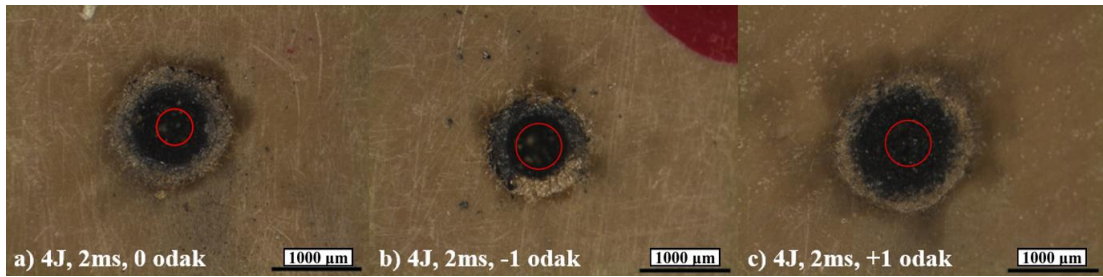
Şekil 4.37’de sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.37. GF - PPS odak farkı dairesellik grafiği

DeneySEL sapmalar göz ardı edildiğinde tüm enerji değerlerinde ve odak mesafelerinde dairesellik değerleri 1'e çok yakındır. Odak mesafesinden bağımsız olarak, rastgele kısa fiber takviyeli kompozit malzemenin izotropik yapısında ısı iletimi homojen bir şekilde gerçekleşip dairesel geometriye çok yakın yüzeyler elde edilmiştir.

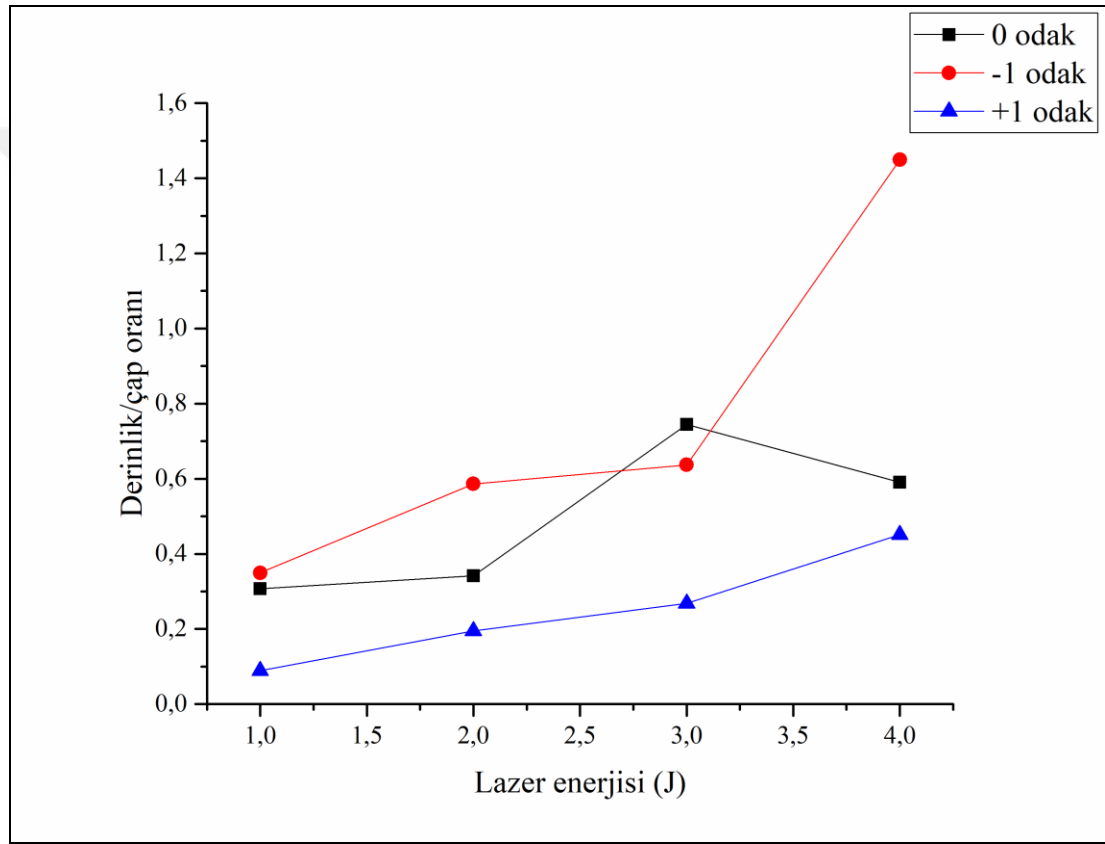
Şekil 4.38'de çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en yüksek enerji ve en düşük atım süresi olan 4 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri görülmektedir;



Şekil 4.38. GF - PPS odak farkı dairesellik yüzey görüntüsü

Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiş olup, lazer ablasyonu yüzey odağında 400  $\mu\text{m}$  odak çapıyla, yüzey altı ve yüzey üstü 1 mm odaklarında ise 500  $\mu\text{m}$  odak çapıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı lazer enerjisi ve atım süresi parametrelerine sahip bu üç farklı odak mesafesinin yüzey görüntüleri incelendiğinde dairesel yapı açıkça görülmektedir.

Şekil 4.39'da sabit 2 ms atım süresinde, 4 farklı lazer enerjisinde, yüzey altı 1 mm, yüzey üstü 1 mm ve yüzeye odaklı olmak üzere üç farklı odak derinliği mesafesinin dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir;

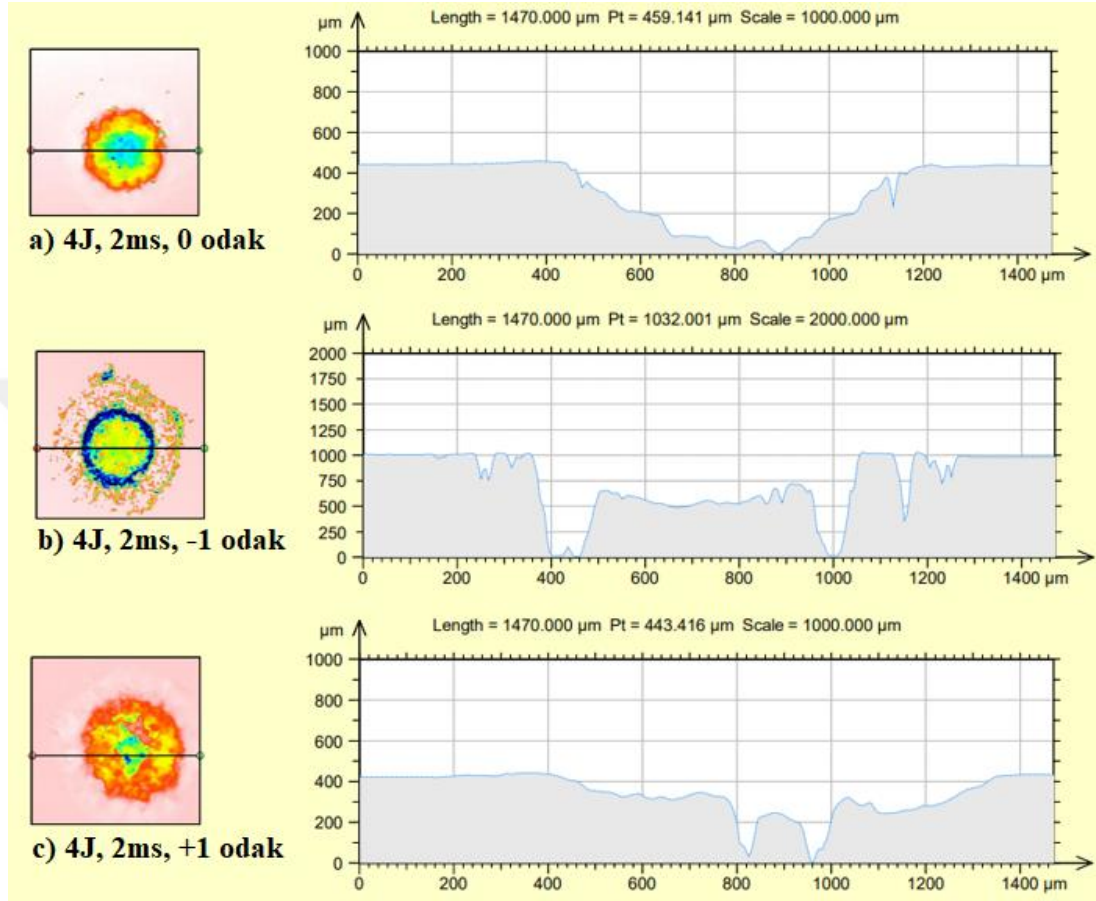


Şekil 4.39. GF - PPS odak farkı derinlik/çap oranı grafiği

Derinlik/çap grafiğinin ablasyon oranı grafiğine benzer bir yapıda olduğu görülmektedir. Fakat artış hızı yüksek bir mertebede değildir, grafiğin eğimi düşüktür. Derinlik/çap oranı yüzey altında en yüksek seviyede, yüzey üzerinde ise en düşük seviyededir. Aynı tarama alanına sahip yüzey altı ve yüzey üstü odaklarında, yüzey altı ile daha düşük çaplarda daha derin çukurlar elde edilirken; yüzey üzerinde daha düşük derinliklerde daha geniş çukurlar elde edilebilmektedir. Yüzey odağı ise bu iki odak çeşidinin arasında yer almaktadır.



Şekil 4.40'ta çalışma kapsamında çalışılan sırasıyla en yüksek enerji ve en düşük atım süresi olan 4 J ve 2 ms lazer çalışma parametreleri altında 3 farklı odak derinliğine ait çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri görülmektedir.



Şekil 4.40. GF - PPS odak farkı derinlik/çap oranı kesit görüntüsü

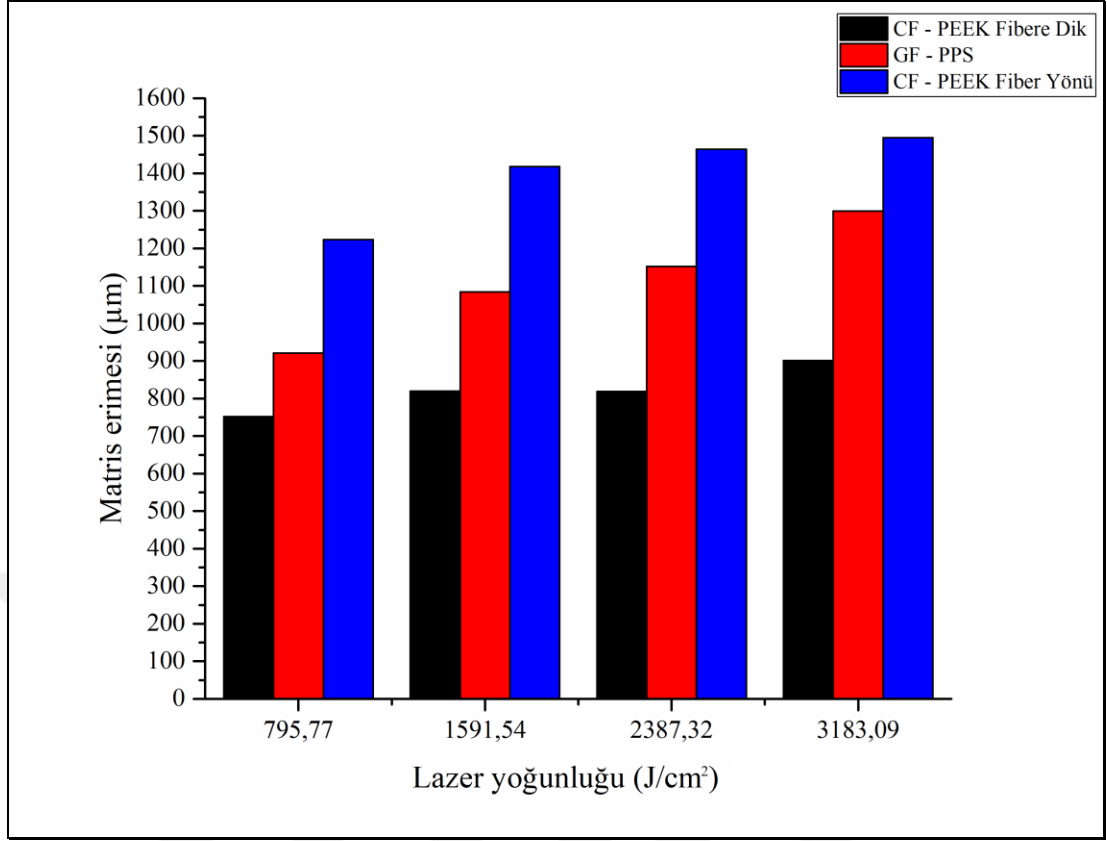
Aynı lazer enerjisi ve atım süresi parametrelerine ait üç farklı yüzey morfolojisi incelendiği zaman yüzey odağında ablyasyon oranı ve derinlik/çap oranı daha düşük olmasına karşın daha düzenli yüzeylerin elde edildiği görülmektedir. Lazer ablyasyonu ile üniform bir malzeme çıkarımı sağlanmıştır. Yüzey üstü odağında yüksek matris erimesi, düşük ablyasyon oranı ve düşük derinlik/çap oranı görülmektedir. Dairesellik istenen düzeyde olmasına karşın yüzey kalitesi oldukça düşük ve düzensiz şekiller görülmektedir. Malzeme çıkarımı yüksek enerji ve düşük atım süresinde dahi istenilen düzeyde gerçekleşmemiştir. Yüzey altı odağında ise düşük matris erimesi, yüksek ablyasyon oranı, dairesel yapı ve yüksek derinlik/çap oranı elde edilmiştir. Fakat lazer ablyasyonu ile meydana getirilen çukurların iç kısmında yeniden katılaşmadan dolayı malzeme çıkarımı yüzey odağındaki gibi istenilen yüksek kalitede oluşmamıştır.

### 4.3. Lazer Ablasyonu ile Yüzey Dokusu Oluşturmada Takviye Malzemesi Etkisi

Polimer esaslı malzemelerin görece düşük ısı transfer kapasitesine sahip olmaları lazer ile aktarılan enerjiye kritik bir önem kazandırmaktadır. Lazerin yarattığı yüksek enerji yoğunluğu polimerlerde erime, yanma gibi malzemeye zarar verebilecek termal bozunmalara sebep olabilir. Takviye edilerek kompozit yapıya büründürülmüş polimerlerde bozunma süreci, aynı hacimde farklı ısı transfer yeteneğine, erime noktasına ve soğurma kapasitesine sahip malzemeler barındırdığından dolayı geleneksel malzemelerle kıyaslandığında çok daha karmaşık bir hal almaktadır. Mekanik ve tribolojik uygulamalarda dokularından maksimum verim alınabilmesi için çukurların istenilen formda oluşturulması gerekmektedir. İşlenen yüzeydeki matris erimesi, meydana getirilen çukurlara ait derinlik, dairesellik ve derinlik/çap oranı yüzey kalitesini ve performansını etkileyen oldukça önemli parametreleridir. Çukurlar istenilen geometride minimum malzeme hasarı ile oluşturulmalıdır.

Önceki bölümlerdeki karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-eton) ile cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid kompozitlerinin lazer ablasyonu çalışmalarında lazer parametrelerinin optimizasyonu yapılarak kaliteli fonksiyonel yüzeylerin eldesi için kısa atım süreleriyle çalışılması gerekliliği belirlenmiştir. Bu bölümde çalışma kapsamındaki en düşük atım süresi olan 2 ms değeri altında, takviye tipi farklı olan iki farklı polimer matrisli kompozit malzemede lazer ablasyonu ile yüzey dokusu oluşturulmasının sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılması yapılan iki polimer matrisli kompozit malzeme arasından biri rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiberler ile takviye edilmişken diğeri yönlendirilmiş sürekli karbon fiberler ile takviye edilmiştir. Takviye tipindeki bu farklılığın elde edilen yüzey dokuları üzerine olan etkisi bu bölümde incelenmiştir.

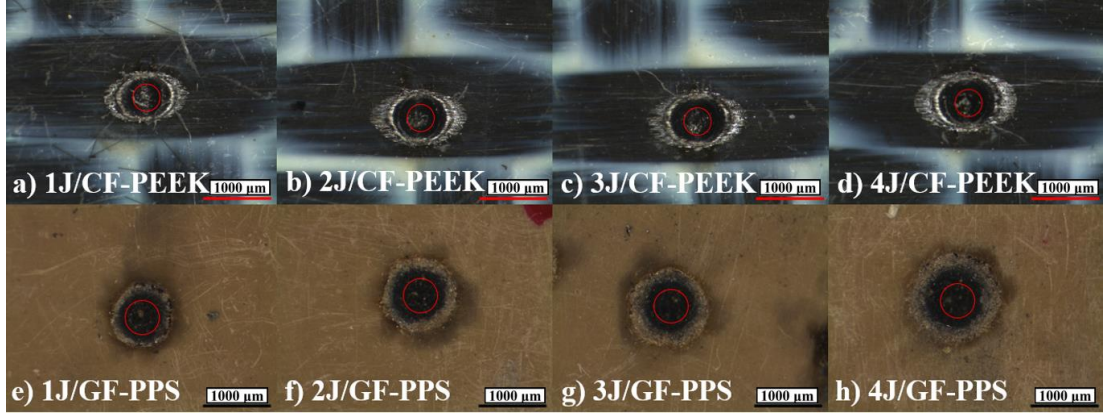
Şekil 4.41’de yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, sabit 2 ms atım süresi değerinde, 4 farklı lazer yoğunluğu altında, iki farklı takviye şeklinin polimer matrisin erimesi üzerindeki etkisi görülmektedir;



Şekil 4.41. Farklı takviye şekillerinde matris erimesi kıyası grafiği

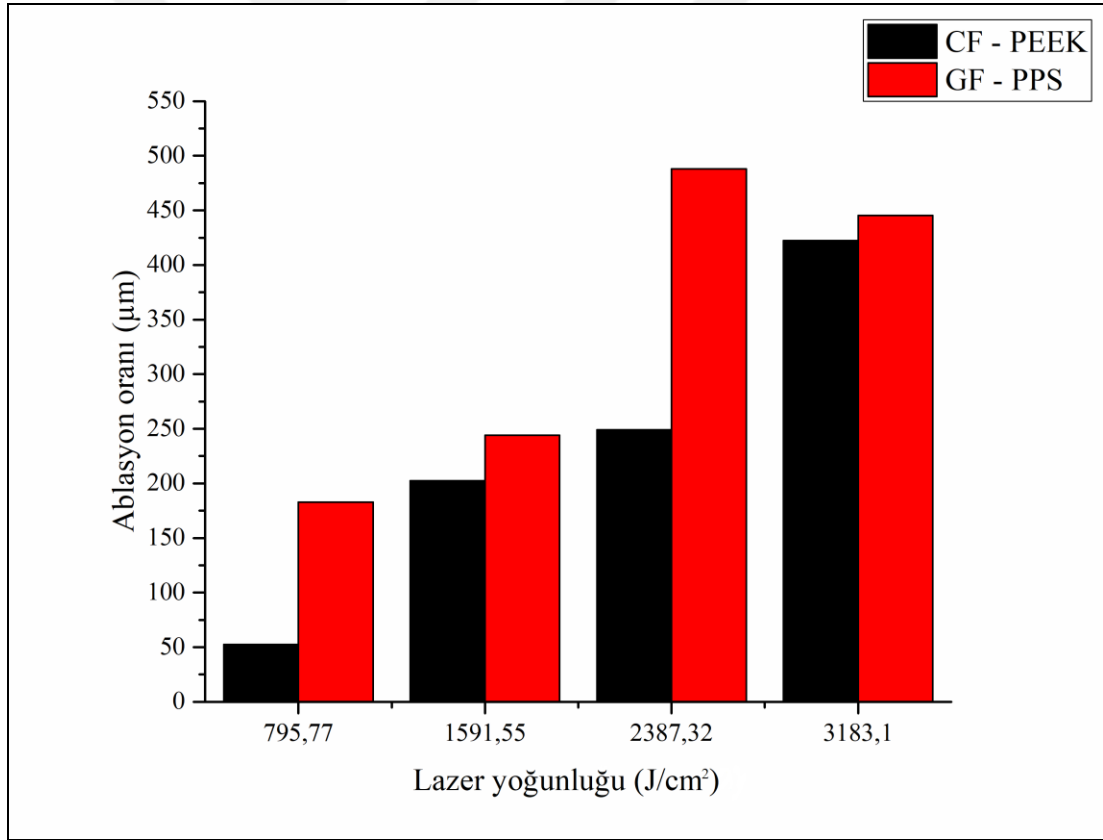
Malzeme yüzeyinde oluşturulan mikro ölçekli çukurların mümkün olan en düşük seviyede ısıdan etkilenen bölgeye sahip olması istenmektedir. Aksi halde başta yorulma dayanımı olmak üzere malzemenin statik ve dinamik özellikleri oldukça kötü etkilenmektedir. Yüzeydeki matris erimeleri incelendiğinde kısa cam fiberlerin yüzeyde ısıyı karbon fiberlerin takviye yönüne nazaran daha az iletmediği ve daha düşük seviyede termal bozunmaya sebep olduğu görülmektedir. Bir diğer yandan cam fiberlerin ısı iletiminden dolayı yüzeyde meydana gelen matris erimesi karbon fiberlerin takviye yönüne dik yönündeki matris erimesinden daha yüksek seviyededir.

Şekil 4.42’de 2 ms atım süresi altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J ve 4 J enerji değerlerinde CF - PEEK ve GF - PPS kompozitlerinin yüzeylerinde meydana gelen çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri verilmiştir. Odak alanları kırmızı daire ile işaretlenmiştir Her iki takviye şeklinde de artan lazer yoğunluğuyla birlikte yüzeydeki matris erimesi artış göstermektedir. Yüksek lazer yoğunluğu termal deformasyonlara sebep olmaktadır. Termal deformasyonlar lazer ışınının malzeme ile etkileşiminde oluşan mekanik titreşimler sebebiyle meydana gelebilmektedir.



Şekil 4.42. Farklı takviye şekillerinde matris erimesi kıyası yüzey görüntüsü

Şekil 4.43'te yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, sabit 2 ms atım süresi değerinde, 4 farklı lazer yoğunluğu altında, iki farklı takviye şeklinin ablastyon oranı üzerindeki etkisi görülmektedir.

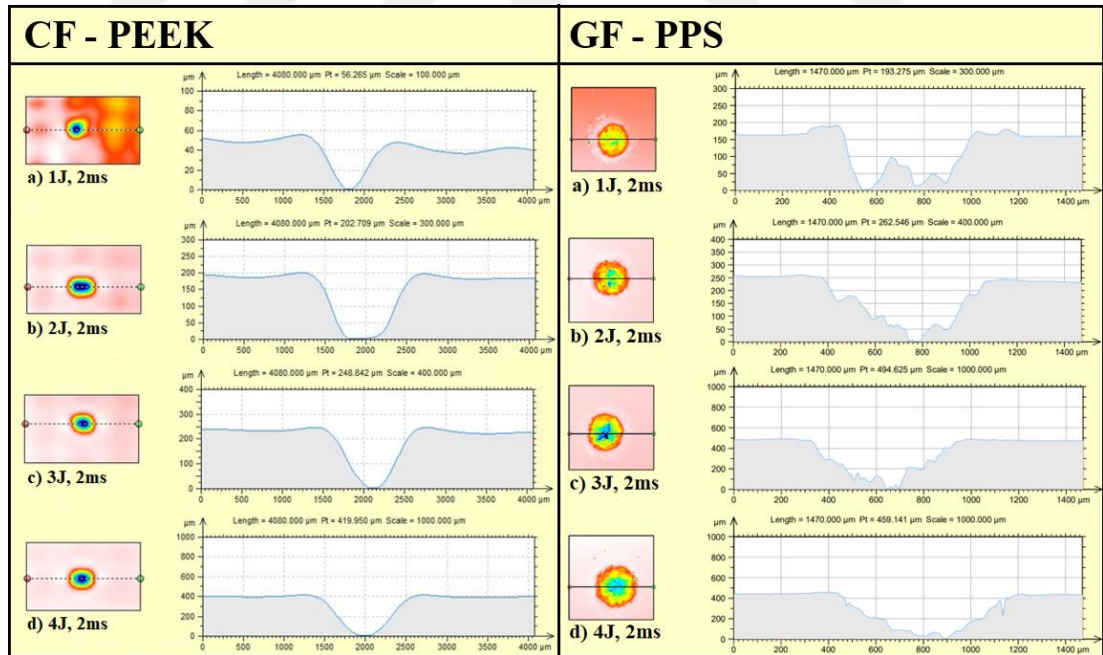


Şekil 4.43. Farklı takviye şekillerinde ablastyon oranı kıyası grafiği

Polimerlerin lazer ablastyonu üzerine yapılan çalışmalarda ablastyon oranının lazer enerjisi ile birlikte arttığını gözlemlemiştir [35-36].

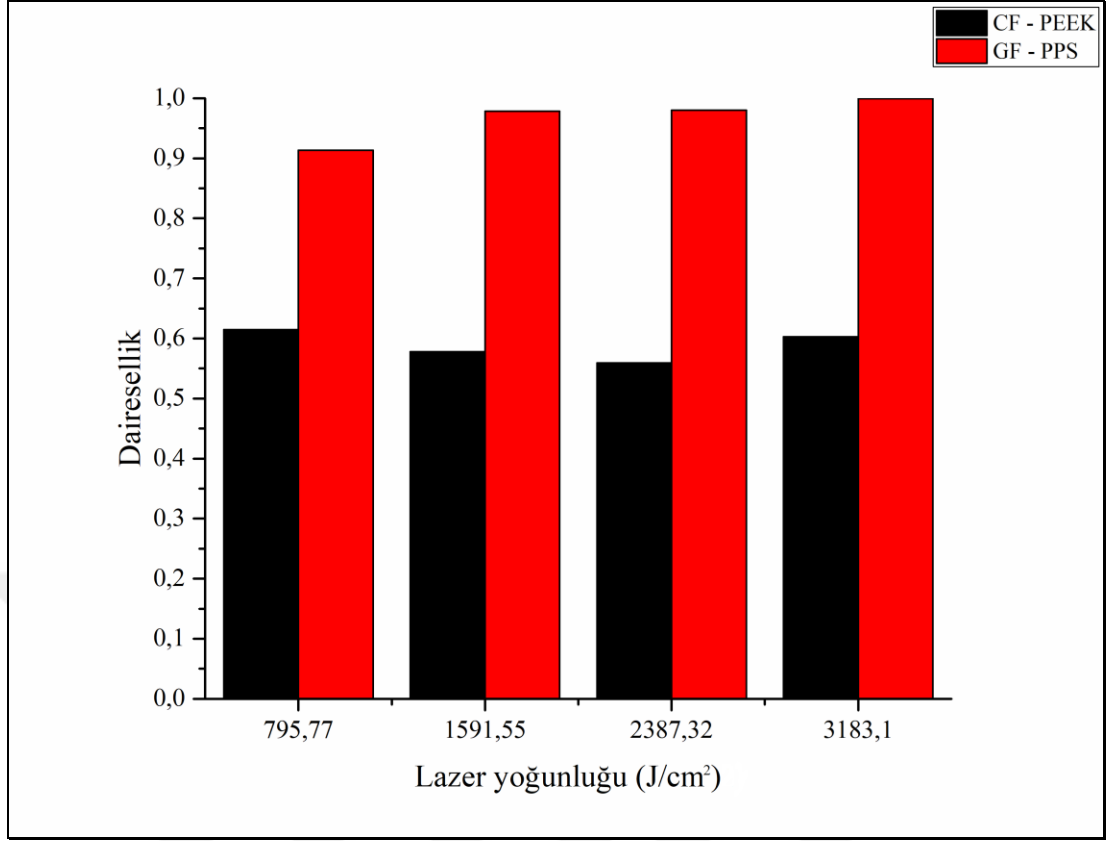
Kısa cam fiber takviyesinde ısı iletiminin derinlik boyunca daha fazla olduğunun ve daha yüksek ablyasyon oranlarının meydana geldiği görülmektedir. Aynı lazer enerjisi ve atım süresi parametrelerinde cam fiber takviyeli Polifenilen sülfid kompozitinde karbon fiber takviyeli Poli(eter-eter-keton) kompozitine kıyasla daha derin çukurlar oluşmaktadır. Karbon fiberlerin ısı iletiminin yüksek oluşu ablyasyon oranını olumsuz etkilemektedir.

Şekil 4.44'te 2 ms atım süresi altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J ve 4 J enerji değerlerinde CF - PEEK ve GF - PPS kompozitlerinin yüzeylerinde meydana gelen çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri verilmiştir. Artan lazer yoğunluğuyla birlikte daha derin ve daha geniş çukurlar elde edilmektedir. Ayrıca GF – PPS kompoziti 1 J lazer enerjisine maruz kaldığında erimiş malzemenin tekrar katılaşması sonucu çukurun iç kısmında zirveler oluşmuştur. Fakat artan lazer enerjisiyle birlikte yeniden katılaşmanın meydana gelmeyip daha düzenli geometrilerin elde edildiği görülmektedir. CF – PEEK kompozitinde ise hiçbir enerji değerinde yeniden katılaşma gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.44. Farklı takviye şekillerinde ablyasyon oranı kıyası kesit görüntüsü

Şekil 4.45'te yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, sabit 2 ms atım süresi değerinde, 4 farklı lazer yoğunluğu altında, iki farklı takviye şeklinin dairesellik üzerindeki etkisi görülmektedir;

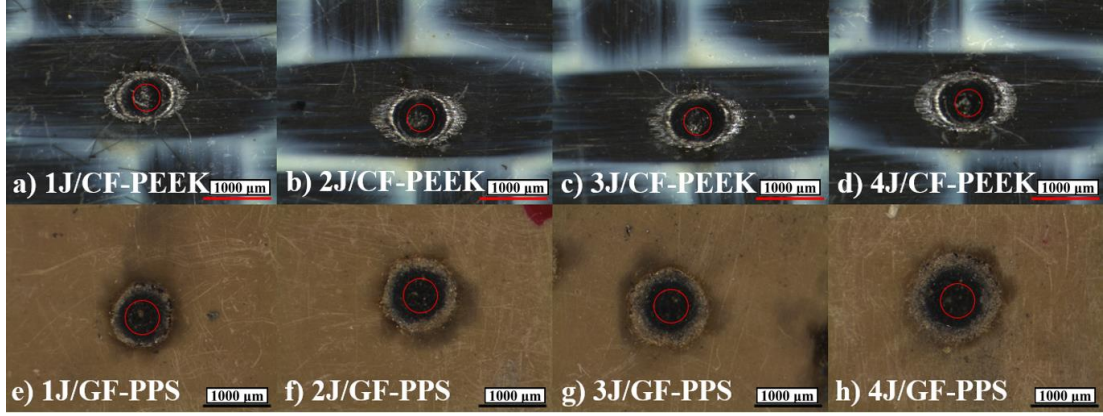


Şekil 4.45. Farklı takviye şekillerinde dairesellik kıyası grafiği

Dairesellik tribolojik uygulamalarda yüzeyin performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Yu ve arkadaşları dairesel çukurların eliptik çukurlardan daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduklarını gösterdiler [68].

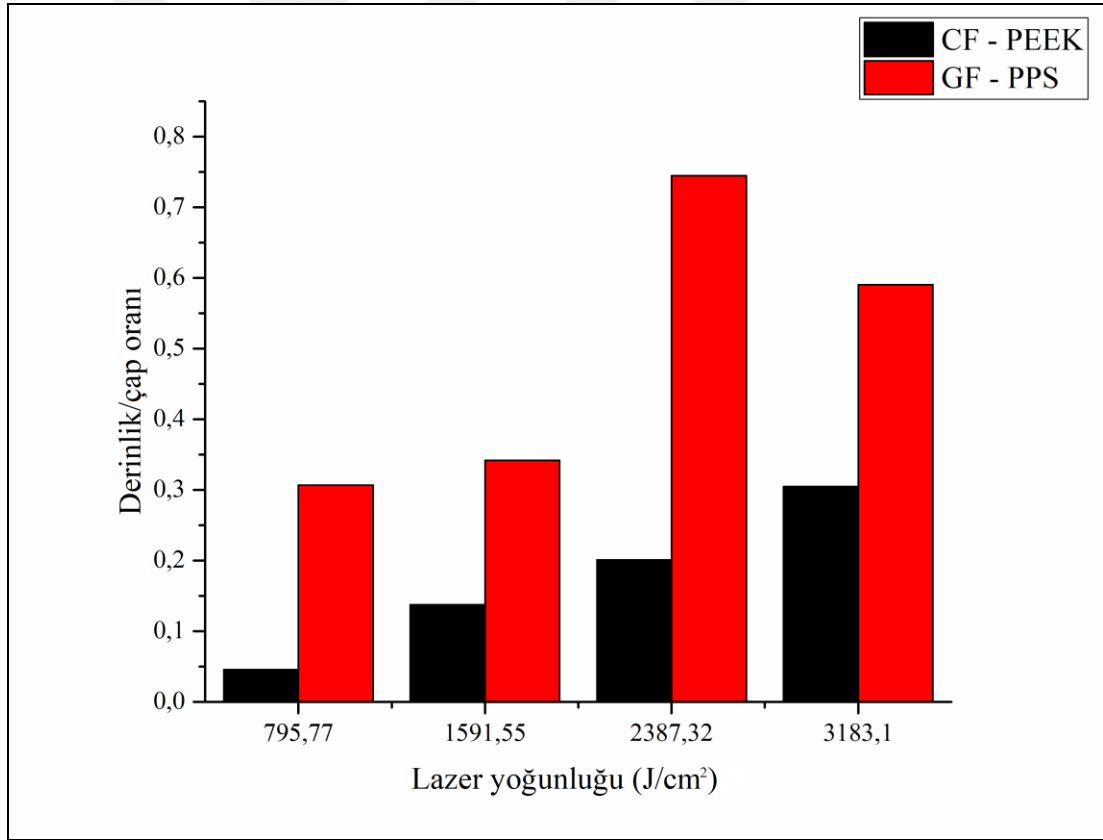
GF – PPS kompozitinde rastgele kısa fiber takviyesi sebebiyle malzemenin neredeyse izotropik özellik göstermesinden dolayı lazer enerjisi malzeme içerisinde homojen şekilde yayılıp neredeyse tamamen dairesel çukurlar elde edilmiştir. Dairesellik değerlerinin 1'e çok yakın olduğu görülmektedir. Fakat sürekli karbon fiber takviyesinde termal iletkenliğin fiber yönünde daha yüksek olmasından dolayı oluşan yüzey dokusunda çukurlar fiber yönüne paralel olarak uzamaktadır ve dairesellikten uzak eliptik yapılar meydana gelmektedir. Bu sebeple fiber şişmesi gibi termal hasarlar fiber yönü boyunca daha fazla gelişir. Daireselliğin farklı enerji değerlerinde 0,6'ya yakın olduğu görülmektedir.

Şekil 4.46'da 2 ms atım süresi altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J ve 4 J enerji değerlerinde CF - PEEK ve GF - PPS kompozitlerinin yüzeylerinde meydana gelen çukurların stereo mikroskop ile çekilmiş yüzey görüntüleri verilmiştir;



Şekil 4.46. Farklı takviye şekillerinde dairesellik kıyası yüzey görüntüsü

Şekil 4.47’de yüzeye sıfır odakta, 400 µm tarama çapında, sabit 2 ms atım süresi değerinde, 4 farklı lazer yoğunluğu altında, iki farklı takviye şeklinin derinlik/çap oranı üzerindeki etkisi görülmektedir;

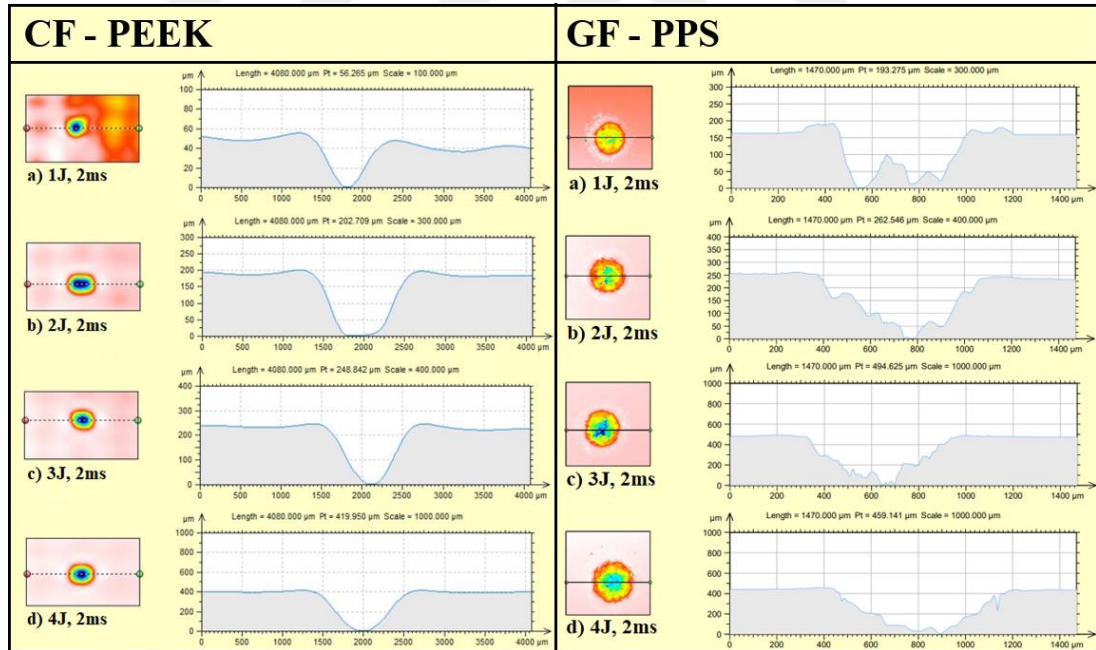


Şekil 4.47. Farklı takviye şekillerinde derinlik/çap oranı kıyası grafiği

Yan ve arkadaşları çukurların alandaki oranının yanı sıra derinliklerinin ve çaplarının da sürtünme katsayısını etkileyen temel parametreler olduklarını göstermişlerdir [69]. Seet ve arkadaşları artan lazer yoğunluğuyla birlikte daha geniş ve daha derin

çukurların oluştuğu sonucunu bildirdiler [70]. Artan lazer yoğunluğuyla birlikte yüzeyde hem daha derin hem de daha geniş çukurlar elde edilmektedir. Bunun yanı sıra artan lazer yoğunluğuyla birlikte her iki takviye tipinde de derinlik/çap oranı artış göstermektedir. Fakat bu oran cam elyaf takviyeli kompozitte karbon elyaf takviyeli kompozite kıyasla oldukça yüksektir. En yüksek enerji yoğunluğu değerinde yaklaşık 3 kat daha fazladır.

Şekil 4.48’de 2 ms atım süresi altında sırasıyla 1 J, 2 J, 3 J ve 4 J enerji değerlerinde CF - PEEK ve GF - PPS kompozitlerinin yüzeylerinde meydana gelen çukurların optik profilometre ile çekilmiş kesit görüntüleri verilmiştir. Lazer ablasyonu sonucu oluşan çukurlarda, CF – PEEK kompozitinde küresel bir morfoloji, GF – PPS kompozitinde ise açısallık bir morfoloji meydana geldiği görülmektedir. Tribolojik özellikler büyük ölçüde çukurların boyutlarına ve yüzeydeki yoğunluğuna bağlı olduğundan dolayı oyuk şeklinin yuvarlak veya açısallık olmasının sürtünme katsayısının üzerinde önemli ölçüde bir etkisi yoktur [46].



Şekil 4.48. Farklı takviye şekillerinde derinlik/çap oranı kıyası kesit görüntüsü



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında 1064 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG lazeri ile fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üzerinde lazer ablasyonu ile mikro yüzey dokuları oluşturuldu. Elde edilen test sonuçlarına istinaden üniform bir malzeme çıkarımının gerçekleştirildiği ve lazer yüzey işleminin polimer matrisli kompozitlerin lazer ablasyonunda kullanılabileceği görülmüştür. Elde edilen en değerli kazanım istenilen boyutlarda ve geometride yüzey dokularının oluşturulması imkanıdır. Lazer ablasyonu ile oluşturulan mikron mertebesindeki çukurlar malzemenin aşınma performansını arttırmaktadır. Böylece kullanım ömrü uzamaktadır.

Lazer işlemi polimer ve kompozitleri gibi gelişmiş malzemelerde küçük boyutlarda ve hassas şekilde delik delme, işleme, yüzey dokusu oluşturma gibi uygulamalarda etkili bir yöntemdir. Yüksek mekanik özelliklere sahip, işlenmesi zor malzemeler dahi lazer kullanılarak kolayca işlenebilir. Lazer işleminin performansı lazer parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden yüksek kalitede sonuçlar elde edebilmek için parametre optimizasyonu çok önemlidir. Lazer ile malzeme işlenmesinin kalitesi lazer enerjisi, atım süresi, odak noktası alanı ve mesafesi, darbe tekrarlama frekansı gibi temel lazer parametrelerinin değişimi ile önemli ölçüde etkilenir ve kontrolü yapılabilir. Yüksek kalite eldesi için lazerin çalışma mekanizmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Enerji yoğunluğundaki artışın ablasyon seviyesini arttırdığı fakat aynı zamanda yüzeyde matris malzemesinin erimesine sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bunu sınırlamak için düşük atım sürelerinde çalışılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Lazer enerjisinin yoğunluğu aynı zamanda derinlik/çap oranını da arttırmaktadır. Lazer teknolojisi karbon fiber takviyeli PEEK matrisli kompozit ve cam fiber takviyeli PPS matrisli kompozit gibi işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi için umut verici bir alternatif olduğunu göstermiştir. İşlem sürelerinin geleneksel yöntemlerden daha fazla olduğu durumlar olsa dahi işlem sonundaki mekanik ve termal hasarlar çok daha az seviyededir.

Lazer ablasyonu ile mikro ölçekli işlenmiş polimer esaslı kompozitlerin yüzey kalitesi polimer matrisin takviyesinin türüne, boyutlarına ve dağılımına büyük ölçüde bağlıdır. Lazer ablasyonu polimer esaslı malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı gibi malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılabilir bir karakterizasyon yöntemi olabilir çünkü lazer yüksek hassasiyete sahip tekrarlanabilir bir süreçtir. Lazer ile malzemelerin işlenmesinde malzemenin mekanik özelliklerinin bir etkisi yoktur, termo fiziksel özellikler etkilidir. Lazer ablasyonu sonucu oluşan çukurların şekilleri kompozit malzemelerin içeriklerinin tanımlanmasında yardımcı olabilir çünkü lazer belirli bir sürede yüksek hassasiyette yüzeye sabit bir enerji gönderir ve oldukça güvenilir, tekrarlanabilir bir süreçtir. Belirli bir lazer enerjisine maruz bırakılması sonucunda oluşan çukurların geometrisi ileride malzemenin molekül yapısındaki değişikliklerin tespiti için kullanılacak bir karakterizasyon yöntemi olabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Voisey K. T., Fouquet S., Roy D., Clyne T. W., Fibre Swelling During Laser Drilling of Carbon Fibre Composites, *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**, 1185-1197.
- [2] Sandler J., Werner P., Shaffer M. S. P., Demchuk V., Altstadt V., Windle A. H., Carbon-Nanofibre-Reinforced Poly(ether ether ketone) Composites, *Composites Part: A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, **33**, 1033-1039.
- [3] Velisaris C. N., Seferis J. C., Heat Transfer Effects on the Processing – Structure Relationships of Polyetheretherketone (Peek) Based Composites, *Science and Engineering of Composite Materials*, 1988, **1**(1), 13-22.
- [4] Mathew J. Goswami G. L., Ramakrishnan N., Naik N. K., Parametric Studies on Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Carbon Fibre Reinforced Plastic Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **89-90**, 198-203.
- [5] Flöck J., Friedrich K., Yuan Q., On the Friction and Wear Behaviour of PAN- and Pitch-Carbon Fiber Reinforced PEEK Composites, *Wear*, 1999, **225-229**, 304-311.
- [6] Mata F., Gitonde V. N., Karnik S. R., Davim J. P., Influence of Cutting Conditions on Machinability Aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 Composites Using PCD Tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**, 1980-1987.
- [7] Davim J. P., Reis P., Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments, *Composite Structures*, 2003, **59**, 481-487.
- [8] Li Z. L., Chu P. L., Zheng H. Y., Lim G., C., Li L., Marimuthu S., Negarestani R., Sheikh M., Mativenga P. Laser Machining of Carbon Fibre-Reinforced Plastic Composites, Lawrence J., Pou J., Low D. K. Y., Toyserkani E., *Advances in Laser Materials Processing*, Woodhead Publishing, 136-177, 2010.
- [9] Gautam G. D., Pandey A. K., Pulsed Nd:YAG Laser Beam Drilling: A Review, *Optics and Laser Technology*, 2018, **100**, 183-215.

- [10] Pagano N., Ascari A., Liverani E., Donati L., Campana G., Fortunato A., Laser Interaction with Carbon Fibre Reinforced Polymers, *9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Capri, Italy, 23-25 July 2014.
- [11] Dahotre, N. B., Harimkar, S. P., *Laser Fabrication and Machining of Materials*, Springer, New York, 2009.
- [12] Romoli L., Fischer F., Kling R., A Study on UV Laser Drilling of PEEK Reinforced with Carbon Fibers, *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**, 449-457.
- [13] Baharin A. F. S., Ghazali M. J., Wahab J. A., Laser Surface Texturing and Its Contribution to Friction and Wear Reduction: A Brief Review, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2016, **68**(1), 57-66.
- [14] Buragohain M. K., *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing and Testing*, 1st ed., CRC Press, 2017.
- [15] Chawla K. K., *Composite Materials: Science and Engineering*, 3rd ed., Springer-Verlag, New York, 2012.
- [16] Teti R., Machining of Composite Materials, *Manufacturing Technology*, 2002, **51**(2), 611-634.
- [17] Lau W. S., Yue T. M., Lee T. C., Lee W. B., Un-conventional Machining of Composite Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, **48**, 199-205.
- [18] Daniel I. M., Ishai O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed, Oxford, New York, 2006.
- [19] Rethon R. N., *Particulate-Filled Polymer Composites*, 2nd ed., Rapra, 2003.
- [20] Mallick P. K., *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd ed., CRC Press, 2007.
- [21] Campbell F. C., *Manufacturing Process for Advanced Composites*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2004.
- [22] Campbell F. C., *Structural Composite Materials*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2010.
- [23] Edwards K. L., An Overview of the Technology of Fibre-Reinforced Plastics for Design Purposes, *Materials and Design*, 1998, **19**, 1-10.
- [24] Maiman T. H., Stimulated Optical Radiation in Ruby, *Nature*, 1960, **187**, 493-497.

- [25] Li Z. L., Zheng H. Y., Lim G. C., Chu P. L., Li L., Study on UV Laser Machining Quality of Carbon Fibre Reinforced Composites, *Composites: Part A*, 2010, **41**, 1403-1408.
- [26] Yeo C. Y., Tam S. C., Jana S., Lau M. W. S., A Technical Review of the Laser Drilling of Aerospace Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, **42**(1), 15-49
- [27] Duley W. W., *Laser Processing and Analysis of Materials*, Plenum Press, New York, 1983.
- [28] Ready J. F., *Industrial Applications of Lasers*, Academic Press, San Diego, 1997.
- [29] Haken H., *Laser Theory*, Springer, Berlin, 1983.
- [30] Steen W. M., *Laser Materials Processing*, Springer, London, 1991.
- [31] Geng H., *Manufacturing Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2004.
- [32] Bäuerle D., *Laser Processing and Chemistry*, Springer, Berlin, 2000.
- [33] Vogel A., Noack J., Nahen K., Theisen D., Busch S., Parlitz U., Hammer D. X., Noojin G. D., Rockwell B. A., Birngruber R., Energy Balance of Optical Breakdown in Water at Nanosecond to Femtosecond Time Scales, *Applied Physics B*, 1999, **68**, 271-280.
- [34] Liu X., Du D., Mourou G., Laser Ablation and Micromachining with ultrashort Laser Pulses, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **33**, 1706-1716.
- [35] Liu Z. Q., Feng Y., Yi X.S., Coupling Effects of the Number of Pulses, Pulse Repetition Rate and Fluence During PMMA Ablation, 2000, *Applied Surface Science*, **165**, 303–308.
- [36] Küper S., Brannon J., Brannon K., Threshold Behavior in Polyimide Photoablation: Singleshot Rate Measurements and Surface Temperature Modeling, *Applied Physics A*, 1993, **56**, 43–50.
- [37] Himmelbauer M., Arenholz E., Bäuerle D., Single-Shot UV-Laser Ablation of Polyimide with Variable Pulse Lengths, *Applied Physics A*, 1996, **63**, 87–90.
- [38] Eyett M., Bäuerle D., Wersing W., Thomann H., Excimer-Laser-Induced Etching of Ceramic  $\text{PbTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$ , *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**, 1511–1514.
- [39] Geng Y., Wang K., Dong X., Duan W., Mei X., Wang W., Laser Drilling of Micro-Holes with Small Diameter Beyond the Limits of Focused Spot by Using a Sieve Plate or a Cover Plate, 2016, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **87**, 2471-2484.

- [40] Dubey A. K., Yadava V., Laser Beam Machining – A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**, 609-628.
- [41] Etison I., Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing, *Tribology Letters*, 2004, **17**(4), 733-737.
- [42] He D., Zheng S., Pu J., Zhang G., Hu L., Improving Tribological Properties of Titanium Alloys by Combining Laser Surface Texturing and Diamond-Like Carbon Film, *Tribology International*, 2015, **82**, 20-27.
- [43] Canel T., Bağlan I., Sinmazcelik T., Mathematical Modelling of Laser Ablation of Random Oriented Short Glass Fiber Reinforced Polyphenylene Sulphide (PPS) Polymer Composite, *Optics and Laser Technology*, 2019, **115**, 481-486.
- [44] Canel T., Bağlan I., Sinmazcelik T., Mathematical Modelling of Heat Distribution on Carbon Fiber Poly(ether-ether-ketone) (PEEK) Composite During Laser Ablation, *Optics and Laser Technology*, 2020, **127**, 1-7.
- [45] Li J., Xiong D., Dai J., Huang Z., Tyagi R., Effect of Surface Laser Texture on Friction Properties of Nickel-Based Composite, *Tribology International*, 2010, **43**, 1193-1199.
- [46] Wakuda M., Yamauchi Y., Kanzaki S., Yasuda Y., Effect of Surface Texturing on Friction Reduction Between Ceramic and Steel Materials Under Lubricated Sliding Contact, *Wear*, 2003, **254**, 356-363.
- [47] Cenna A. A., Mathew P., Analysis and Prediction of Laser Cutting Parameters of Fibre Reinforced Plastics (FRP) Composite Material, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, **42**, 105-113.
- [48] Wee L. M., Li L., An Analytical Model for Striation Formation in Laser Cutting, *Applied Surface Science*, 2005, **247**(1), 277-284.
- [49] Powell J., *CO<sub>2</sub> Laser Cutting*, 2nd ed., Springer, London, 1998.
- [50] Tzeng Y., Parametric Analysis of the Pulsed Nd:YAG Laser Seam-Welding Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **102**, 40-47.
- [51] Beal V. E., Paggi R. A., Salmoria G. V., Lago A., Statistical Evaluation of Laser Energy Density Effect on Mechanical Properties of Polyamide Parts Manufactured by Selective Laser Sintering, *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, **113**(5), 2910-2919.
- [52] Kumar H., Davim J. P., Role of Powder in the Machining of AL-10% SiCp Metal Matrix Composites by Powder Mixed Electric Discharge Machining, *Journal of Composite Materials*, 2011, **45**(2), 133-151.
- [53] Chryssolouris G., *Laser Machining Theory and Practice*, 1st ed., Springer, New York, 1991.
- [54] Yilbas B. S., *Laser Drilling Practical Applications*, Springer, New York, 2013.

- [55] Salonitis K., Stournaras A., Tsoukantas G., Stavropoulos P., Chryssolouris G., A Theoretical and Experimental Investigation on Limitations of Pulsed Laser Drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **183**, 96-103.
- [56] Yilbas B. S., Study of Affecting Parameters in Laser Hole Drilling of Sheet Metals, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1987, **109**(4), 282-287.
- [57] Yilbas B. S., Parametric Study to Improve Laser Hole Drilling Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **70**, 264-273.
- [58] Bandyopadhyay S., Sundar J. K. S., Sundararajan G., Joshi S. V., *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **127**, 83-95.
- [59] Cheng C. F., Tsui Y. C., Clyne T. W., Application of a Three-Dimensional Heat Flow Model to Treat Laser Drilling of Carbon Fibre Composites, *Acta Materialia*, **46**(12), 4273-4285.
- [60] Parlevliet P. P., Bersee H. E. N., Beukers A., Residual Stresses in Thermoplastic Composites – A Study of the Literature – Part I: Formation of Residual Stresses, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, **37**, 1847-1857.
- [61] Parlevliet P. P., Bersee H. E. N., Beukers A., Residual Stresses in Thermoplastic Composites – A Study of the Literature – Part II: Experimental Techniques, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, **38**, 651-665.
- [62] Parlevliet P. P., Bersee H. E. N., Beukers A., Residual Stresses in Thermoplastic Composites – A Study of the Literature – Part III: Effects of Thermal Residual Stresses, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, **38**, 1581-1596.
- [63] Kumar D., Rajmohan T., Venkatachalapathi S., Wear Behavior of PEEK Matrix Composites: A Review, *Materials Today*, 2018, **5**, 14583-14589.
- [64] <https://kbc-shinsozai.com/wp-content/uploads/2014/10/%E3%80%90TenCate%E3%80%91Data-sheet-TC1200.pdf> (Ziyaret tarihi: 14 Aralık 2020).
- [65] Ji X. L., Yu D. H., Zhang W. J., Wu Z. W., The Multiple Melting Behaviour of Immiscible Poly(ether ether ketone) / Poly(ether diphenyl ether ketone) Blend, *Polymer*, 1997, **14**, 3501-3504.
- [66] Coban O., Boran M. O., Fidan S., Kutluk T., Sinmazcelik T., Heat Treatment Effect on Solid Particle Erosion Properties of Polyphenylene Sulfide Composites Reinforced with Silane Coupled Volcanic Ash Particles, *Polymer Composites*, 2018, **39**, 1638-1646.
- [67] <http://hipolymers.com.ar/pdfs/fortron/datos/fortron%201140L4.pdf> (Ziyaret tarihi: 14 Aralık 2020).

- [68] Yu H., Deng H., Huang W., Wang X., The Effect of Dimple Shapes on Friction of Parallel Surfaces, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2011, **225**, 693-703.
- [69] Yan D., Qu N., Li H., Wang X., Significance of Dimple Parameters on the Friction of Sliding Surfaces Investigated by Orthogonal Experiments, *Tribology Transactions*, 2010, **53**(5), 703-712.
- [70] Seet H. L., Tan L. S., Hong M. H., Lee K. S., Teo H. H., Lui C. H., Li X. P., Laser-Drilled PVC Template For Electrodeposition of Multi-Core Orthogonal Fluxgate Sensing Element, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**, 4429-4433.





## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Korkusuz O. B.**, Sınmazçelik T., Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Lazer Ablasyonu, *5. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 04 - 05 Aralık 2020.



## ÖZGEÇMİŞ

İlköğretimini Sakarya'da tamamladı. 2014 yılında Sakarya Cevat Ayhan Fen Lisesi'nden, 2018 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden, 2021 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan mezun oldu. 2019 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

