

## Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması

Mustafa AY<sup>1</sup>, Fatih YÜCELİŞLİ

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
\*mustafaay@firat.edu.tr

(Geliş/Received:26.03.2018; Kabul/Accepted: 10.07.2018)

### Özet

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının Fiber Lazer ile kesme işleminde akım şiddeti, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı gibi işlem parametrelerinin kesme ve ürün kalitesine etkileri araştırılmıştır. Parametreler ve faktör seviyelerine göre, kesme işlemleri sonrasında, numunelerin kerf genişlikleri, kerf eğim açıları, yeniden katılan tabaka kalınlığı (YKTK) ve yüzeylerinde meydana gelen metalurjik değişimler; X – ışınları difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) yöntemleri kullanılarak ölçülmüş ve kesme parametrelerinin işlem kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Sonuç olarak, gücün artması ile yeniden katılan tabaka kalınlığı ve kerf genişliği artmış, kesme hızının artması ile kerf genişliği ve yeniden katılan tabaka kalınlığı azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber Lazer Kesim, Ti6Al4V, Yüzey morfolojisi

### Investigation of the Effect on Cutting Quality of Process Parameters in Fiber Laser Cutting of Ti-6Al-4V Alloy

#### Abstract

In this study, the effect of cutting parameters such as current intensity, cutting speed and gas pressure on cutting and product quality of Ti-6Al-4V alloy in fiber laser cutting process were investigated. According to the parameters and factor levels, after the cutting operations, the kerf widths, taper angles, the recast layer thickness and metallurgical changes occurring in the cutting surfaces of the samples were measured using X - ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) methods and the effects of cutting parameters on the process quality were determined. As a result, increased recast layer thickness and kerf width, increased cutting speed, and decreased kerf width and recast layer thickness increased with increasing power.

**Keywords:** Fiber Laser cutting, Ti6Al4V, Surface morphology

#### 1. Giriş

Titanyum (Ti) alaşımları, düşük yoğunluk-yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda sertlik, yorulma direnci gibi üstün performans özelliklerinden dolayı tıbbi, havacılık, otomotiv, petrokimya, nükleer ve elektrik üretim endüstrisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu alanlardaki zorlu çalışma koşulları Ti ve alaşımları tarafından etkili bir şekilde karşılanmakta, ancak artan ham madde ve işleme maliyetleri özellikle otomotiv ve uçak

Lazer kesim işlemi, geleneksel kesme yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunar. Dar çentik genişliği (minimum malzeme kaybı), düz kesim kenarları, kesme yüzeylerinin düşük pürüzlülüğü, minimum metalurjik ve yüzey

endüstrisinde kullanımlarını oldukça seçici hale getirmektedir. Diğer taraftan Ti ve alaşımlarının düşük ısı iletkenliği, düşük elastik modülü ve yüksek sıcaklıklarda takım ömrünü olumsuz etkileyen yüksek kimyasal afinitelerinden dolayı geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmesi zaman ve maliyet açısından problem yaratmaktadır [4]. Ti alaşımlarının geleneksel endüstriyel uygulamalarda daha geniş çapta kullanılmasını sağlamak ve imalatıyla ilgili zorlukları, maliyetleri azaltmak için geleneksel imalat yöntemlerinden ziyade ileri imalat süreçlerinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

bozulmaları, karmaşık profillerin kesilmesi ve sürecin temassız gerçekleşmesinden dolayı lazer kesim Ti alaşımlarının işlenmesinde umut verici bir süreçtir [5]. Literatürdeki bazı çalışmalarda, Ti ve alaşımlarının kesiminde, Nd: YAG lazer ve

sürekli dalga modunda (CW) çalışan CO<sub>2</sub> lazeri kullanılmıştır. Rao ve diğ. [6] 1 mm kalınlığında Titanyum plakanın darbeli CO<sub>2</sub> lazer kesimi için N<sub>2</sub>, Ar ve He yardımcı gazları kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, yüksek frekanslı ve düşük çalışma döngüsü darbe modu ile fark edilmeyen bir HAZ ve curufsuz kesimler elde edildiği. Helyum, yüksek ısı konveksiyonu ve yüksek kesme gerilmesi üretme yeteneği nedeniyle, kesme gazı olarak argon ile üretilenlere kıyasla dar HAZ ve düşük çapaklı kesimleri oluşturduğu rapor edilmiştir. Shanjin ve Yang [7] çalışmalarında, Ti alaşımları, oksijen yardımcı gazı ile kesildiğinde, düşük basınçta bile, geniş kesme kanalı ve düşük yüzey kalitesi ile sonuçlandığını. Titanyumun oksijen ve nitrojen ile reaksiyonu, sert ve kırılğan ince bir oksit ve nitrit tabakası oluşturduğu, ayrıca nitrojen veya argon yardımcı gaz ile kıyaslandığında çok daha kalın ısıdan etkilenen bölgenin olduğu belirtilmiştir. Andersson ve Granberg [8], Ti6Al4V plakayı CO<sub>2</sub> lazer ile kesiminde işlem parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Malzeme kalınlığının artması ile ısıdan etkilenen bölgenin, yüzey düzensizliği ve çapak yüksekliğinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Azot ile kesilen numunelerin Argon ile kesilen numunelere kıyasla daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip olduklarını belirtmişlerdir. Fiber ve CO<sub>2</sub> lazerlerinin teknik ve ticari açıdan karşılaştırılmasıyla, fiber lazerler, yüksek derecede yansıtıcı malzemeleri ve ince kesit metalleri keserken (yaklaşık 4 mm'nin altında) CO<sub>2</sub> lazerlere nazaran daha iyi olduğunu göstermektedir [9]. Ayrıca, Fiber lazerlerin

kullanımı, işlem süresinin büyük ölçüde azalmasından dolayı üretim maliyetlerini düşürme stratejisinin uygulanmasına izin vermektedir [10].

Bu çalışmada, Ti6Al4V Titanyum alaşımının Fiber Lazer ile kesilmesinde lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı gibi parametrelerin kesme kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada, kerf genişliği, kerf eğim açısı ve yeniden katılğan tabak kalınlıkları ölçülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiş olan endüstride Gr5 olarak isimlendirilen 2mm kalınlığında Ti6Al4V titanyum alaşımı plaka kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Ti	Al	V	Fe	C	N	O
89,7	6,01	3,89	0,2	0,01	0,018	0,15

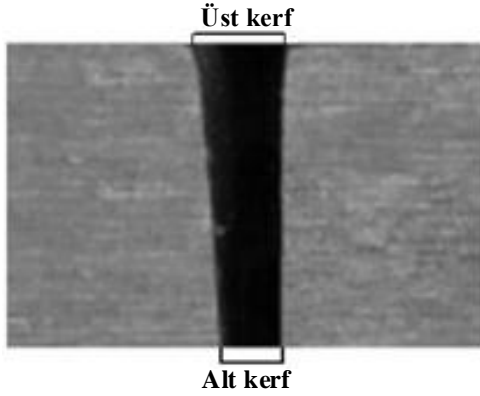
Fiber lazer ile kesme deneyleri Bursa Ermaksan A.Ş. firmasında Fibermak G Force Fiber Lazer kesim tezgahı ile yapılmıştır. Deneylerde, lens çapı 150 mm, nozul çapı 2 mm, yardımcı gaz tipi Argon (Ar), puls frekansı 200 Hz ve odak pozisyonu -1,2 (Yüzey altı) sabit tutulmuş. Güç 3000 – 3500 – 4000 wat, yardımcı gaz basıncı 12 – 15 – 18 bar, kesme hızı 13600 – 16000 – 18400 mm/dak değerleriyle kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 2' de, verilen parametreler ve seviyeleri kullanılarak toplam 27 deney yapılmıştır.

**Tablo 2.** Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri

Kesme Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Lazer Gücü (W)	3000	3500	4000
Puls Frekansı (Hz)		200	
Kesme Hızı (mm/dak)	13600	16000	18400
Yardımcı Gaz		Ar	
Gaz Basıncı (Bar)	12	15	18
Nozul Çapı (mm)		2	
Lens Çapı (mm)		150	
Odak Pozisyonu (mm)		-1,2 (Yüzey altı)	

Her bir parametre ile yapılan kesme deneyleri sonunda, Şekil 1' de şematik olarak gösterildiği gibi alt ve üst kerf genişlikleri kerf boyunca beş ayrı noktadan 0.002 hassasiyete sahip (Model 98-

0001, SCHERR TUMICO, U.S.A) ölçüm mikroskopuyla ölçüldü. Bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak numunelerin kerf genişlik değeri belirlendi.



Şekil 1. Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi

Mikroskopta ölçülen alt ve üst kerf genişlikleri değerine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla kerf eğim açısı ( $K_{e.a}$ ) hesaplanmıştır.

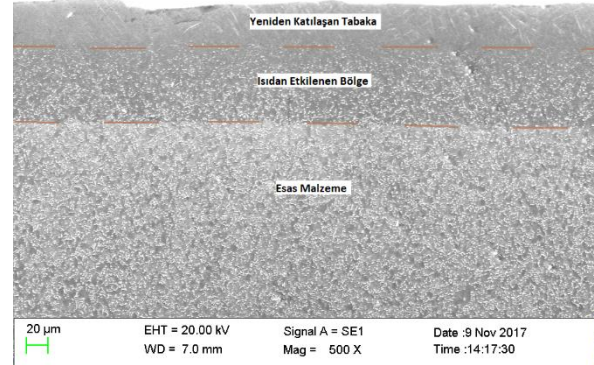
$$K_{e.a} = \frac{(K_{\bar{u}} - K_a) \cdot 180}{2 \cdot \pi \cdot t} \quad (1)$$

Burada,  $K_{\bar{u}}$ , üst kerf genişliği  $K_a$ , alt kerf genişliği  $t$  ise iş parçası kalınlığını ifade etmektedir. Kesme deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey görüntüleri, yüzeylere ait mikro yapıları ve ısıdan etkilenen bölgeleri belirlemek için, işlenen yüzeye dik komşu bir yüzey seçildi. Numuneler bakalite alındıktan sonra bu yüzeyler sırasıyla, 400, 800 ve 1200 mesh' lik zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra  $3\mu\text{m}$  ve  $1\mu\text{m}$ ' lik elmas pasta kullanılarak çuhayla parlatılmış ve sonra alkolle yıkanarak kurutulmuştur. Dağlama işleminde, Ti-6Al-4V için keller çözeltisi (%0,5 HF - %1,5HCl - %2,5HNO<sub>3</sub> - %95,5 H<sub>2</sub>O) kullanılmıştır. Dağlama işleminin ardından, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numunelere ait SEM görüntüleri alınırken numunelerin kesilmiş yüzeylerinde oluşan elementer içerikleri ve fazları tespit etmek için EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin mikrosertlik ölçümleri, yeniden katılan tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme olmak üzere üç ayrı bölgeden altışar adet olmak üzere toplam 18 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Deney sonrası numunelerin mikroyapı incelemesi

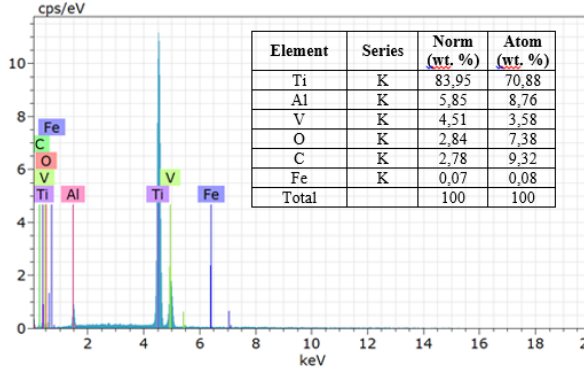
Lazer ışını ile kesme esnasında oluşan temel metalürjik etkiler, yeniden katılan tabaka ve ısıdan etkilenen bölgenin şekil ve boyutlarındaki değişimlerdir. Şekil 2'de fiber lazer ile kesilmiş bir yüzeyden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde, üç farklı bölge görülmektedir. En üstte bulunan yeniden katılan tabakadır. Bu tabaka, lazer ışını ile kesme esnasında eriyik metalin yardımcı gaz basıncı ile kesme kanalından uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılması sonucunda oluşmaktadır. Isıdan etkilenen bölge ise, kesme esnasında ergimenin olmadığı fakat meydana gelen ısının tesiriyle esas metalin mikroyapı değişikliğine uğradığı bölgedir. En altta ise esas malzeme bulunmaktadır.



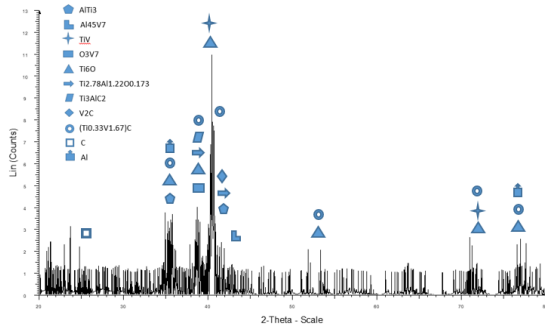
Şekil 2. Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen yüzeysel bölgeler

Numunenin yeniden katılan tabaka bölgesinden alınan EDS sonuçları Şekil 3' de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde oksitlenmeden kaynaklanan O miktarı % 2,84 olarak ortaya çıkmıştır. C miktarı ise % 0,01' den % 2,78' e yükselmiştir. Bu durum Şekil 4' de verilen XRD sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde lazer ışınıyla kesme işlemi sonrasında bu bölgede oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile yapıda bulunan ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrise geri çözüldüğü düşünülmektedir. Bununla birlikte çoğu numunenin içerisinde ise Oksijen elementi

görülmüştür. Bu fazın yapı içerisinde bulunmasının sebebi titanyum metalinin yüksek sıcaklıklarda oksijene karşı afinitesinin yüksek olmasıdır. Sıcaklık değerinin fazla olması oksit fazlarının görülmesinin en büyük sebebidir.



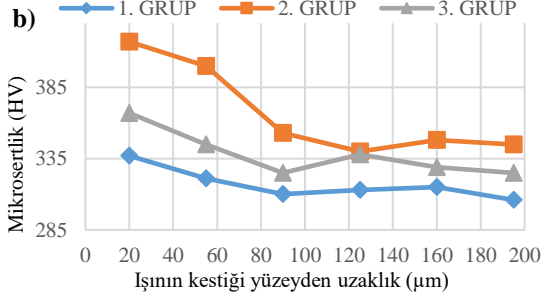
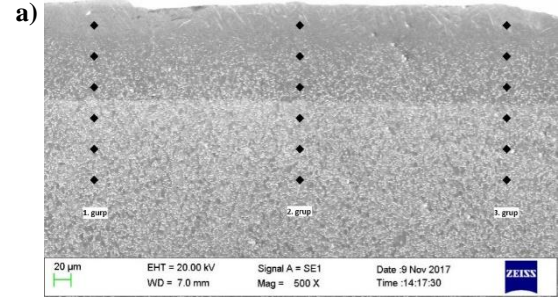
Şekil 3. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi



Şekil 4. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi

Lazer ışını ile kesme neticesinde, yüksek ısının etkisiyle kesme bölgesinde oluşan en önemli değişikliklerden birisi de malzemedeki mikrosertlik değişimidir. Kesme işleminden sonra, Şekil 5 a' da gösterildiği gibi kesilen yüzeye dik komşu bir yüzey üzerinde üç ayrı bölgeden altışar adet olmak üzere toplam 18 noktadan alınan mikro sertlik dağılımları Şekil 5 b' de verilmiştir. Şekil 5b'de görüldüğü gibi, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeyle benzerlik gösterirken, yeniden katılacak tabakanın sertliği ana malzemeye göre daha yüksektir. Malzemedeki yeniden katılacak tabakanın sertlik artışı da malzemenin kesme bölgesinde aşırı ergime ve hızlı soğuma neticesinde mikroyapıda aşırı doymuş  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artışında kısmen rol almaktadır. Bununla birlikte yeniden katılacak

tabakada sertliğin artması, XRD analizinde de görüldüğü gibi oksit tabakasının oluşması ve karbon gibi çözünmüş atmosferik elementlerin artması ile düzensiz bir mikroyapı ortaya çıkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. a) Mikrosertlik alınan noktalar  
b) Mikrosertlik ölçüm sonuçları

### 3.2 Yeniden Katılacak Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları

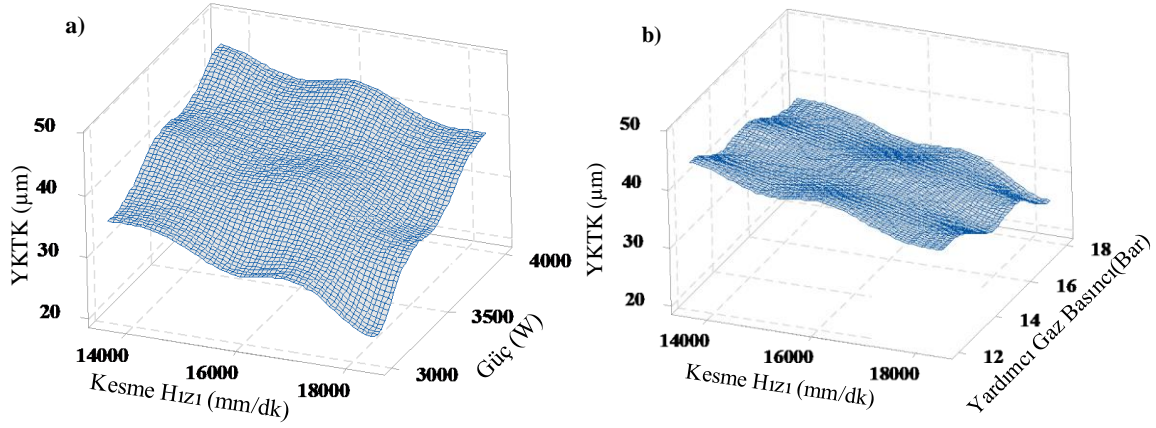
Tablo 3'de kesme parametrelerine bağlı olarak değişen ortalama yeniden katılacak tabaka kalınlığı, kerf genişliği ve kerf eğim açısı değerleri toplu olarak verilmiştir. Tablo 3'deki numunelere ait yeniden katılacak tabaka kalınlığı değerleri ve bu değerlere ait grafik (Şekil 6) incelendiğinde, lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncı parametreleri, kesme esnasında iş parçasına giren ısı miktarını belirleyen temel parametreler olduğu açıkça görülmektedir. Düşük güç ve yüksek ilerleme hızlarında, iş parçasına giren ısı miktarı düşük olacağından dolayı yeniden katılacak tabakanın kalınlığı da düşük olmaktadır. Bir başka değişle, sabit güç yoğunluğunda ilerleme hızının artmasıyla, ısı iletim süresi düşer ve dolayısıyla ısının meydana getirdiği hasarların genişlemesi daha az olur. Ek olarak, lazer-iş parçası etkileşim bölgesinden ergimiş metalin atılmasına yardımcı olan gaz basıncının artmasıyla, metal yüzeyinde soğutma etkisi sağlanır, bu da yeniden katılacak tabakanın

kalınlığının azalmasına yardımcı olur [11,12]. Şekil 7’de deney parametrelerinin yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren SEM görüntüleri görülmektedir.

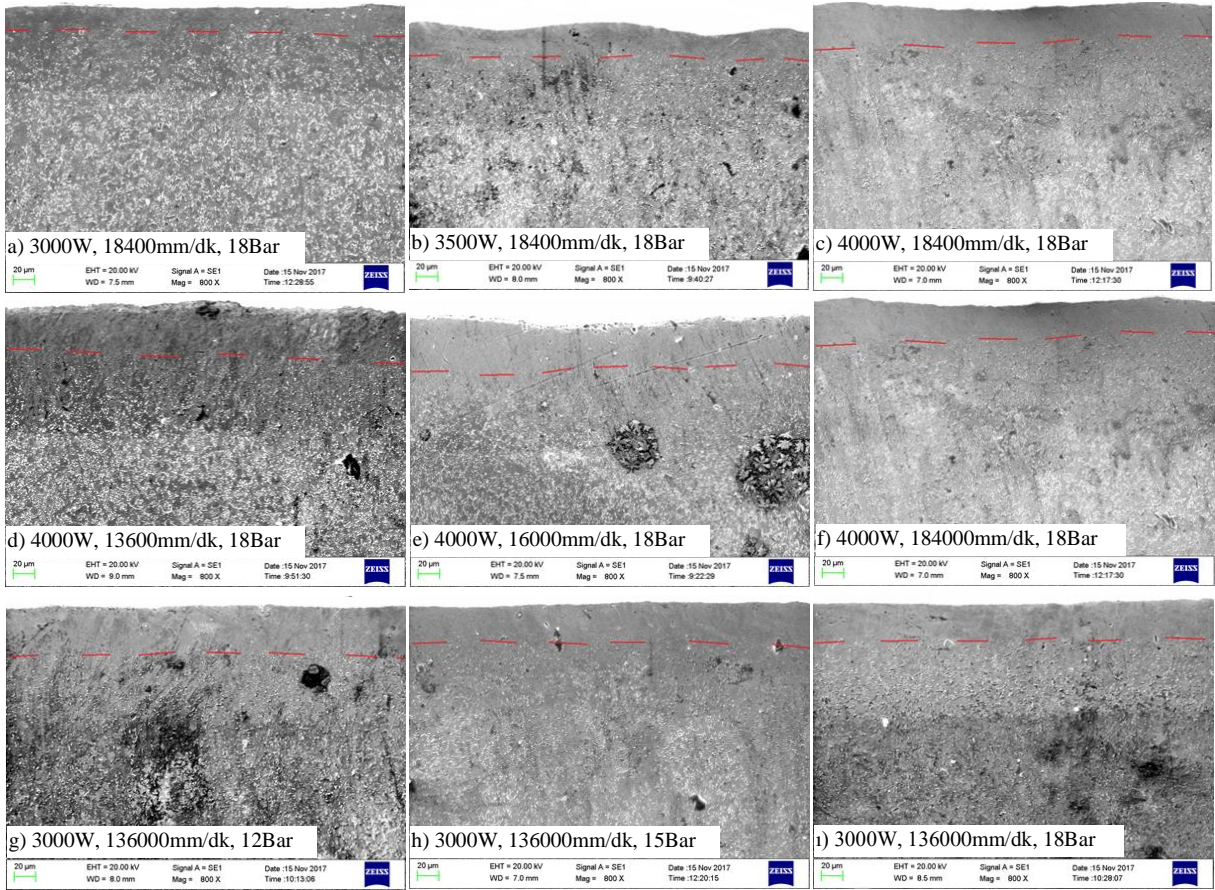
Şekillerden de görüldüğü gibi, lazer gücünün artmasıyla yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı artmakta, kesme hızının ve gaz basıncının artmasıyla yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı düşmektedir.

**Tablo 3.** Lazer ışını ile kesme sonrasında elde edilen ölçüm sonuçları

Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)	YKTK (µm)	Ortalama Üst Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Alt Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Kerf Eğim Açısı (°)
1	3000	13600	12	40,7	0,312	0,268	0,63
2	3000	13600	15	35,47	0,315	0,28	0,501
3	3000	13600	18	29,24	0,318	0,288	0,43
4	3000	16000	12	34,62	0,3	0,252	0,688
5	3000	16000	15	30,5	0,303	0,261	0,602
6	3000	16000	18	23,46	0,307	0,269	0,544
7	3000	18400	12	27,6	0,279	0,226	0,759
8	3000	18400	15	21,68	0,284	0,233	0,731
9	3000	18400	18	20,15	0,287	0,24	0,673
10	3500	13600	12	44,32	0,341	0,307	0,487
11	3500	13600	15	41,3	0,345	0,312	0,473
12	3500	13600	18	38,21	0,348	0,321	0,387
13	3500	16000	12	42,12	0,321	0,28	0,587
14	3500	16000	15	37,84	0,325	0,289	0,516
15	3500	16000	18	33,23	0,327	0,295	0,458
16	3500	18400	12	36,4	0,291	0,241	0,716
17	3500	18400	15	31,26	0,294	0,254	0,573
18	3500	18400	18	25,36	0,297	0,26	0,53
19	4000	13600	12	47,38	0,365	0,336	0,415
20	4000	13600	15	46,41	0,372	0,345	0,387
21	4000	13600	18	42,45	0,378	0,352	0,372
22	4000	16000	12	45,74	0,351	0,318	0,473
23	4000	16000	15	43,8	0,354	0,323	0,444
24	4000	16000	18	39,56	0,362	0,334	0,401
25	4000	18400	12	43,1	0,33	0,284	0,659
26	4000	18400	15	38,4	0,333	0,297	0,516
27	4000	18400	18	32,18	0,337	0,307	0,43



Şekil 6. Farklı parametrelere bağlı yeniden katılan tabaka kalınlığının değişimi



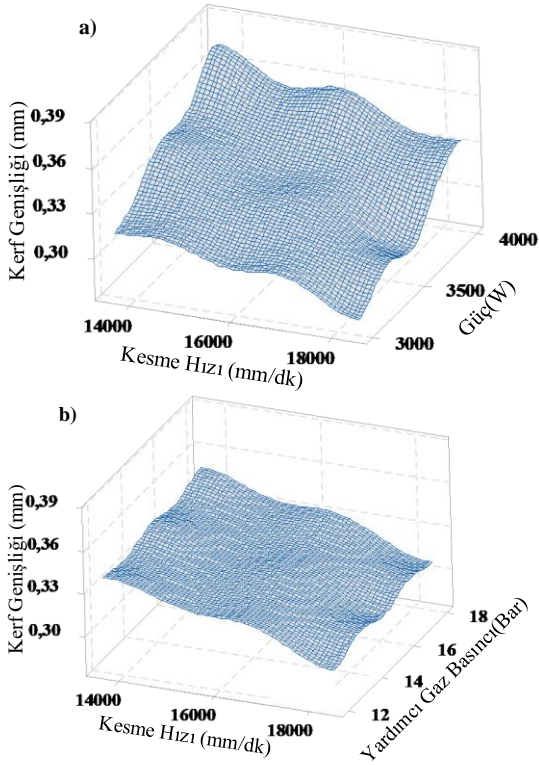
Şekil 7. Deneysel parametrelerinin yeniden katılan tabaka kalınlığına etkisi

### 3.3. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

Kerf genişliği ölçümleri, kesmenin başladığı uç noktadan başlayarak kerf boyunca parçanın üzerinden farklı noktalardan ölçülerek bu ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır. Ölçümler sonucunda, kesme mesafesi boyunca

uçtan sona doğru gidildikçe kerf genişliğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu da, kesme işlemi esnasında ısının iş parçasında yarattığı ısının birikmesi ve lazer ışınında meydana gelen sapmalar neticesinde oluşmaktadır [13].

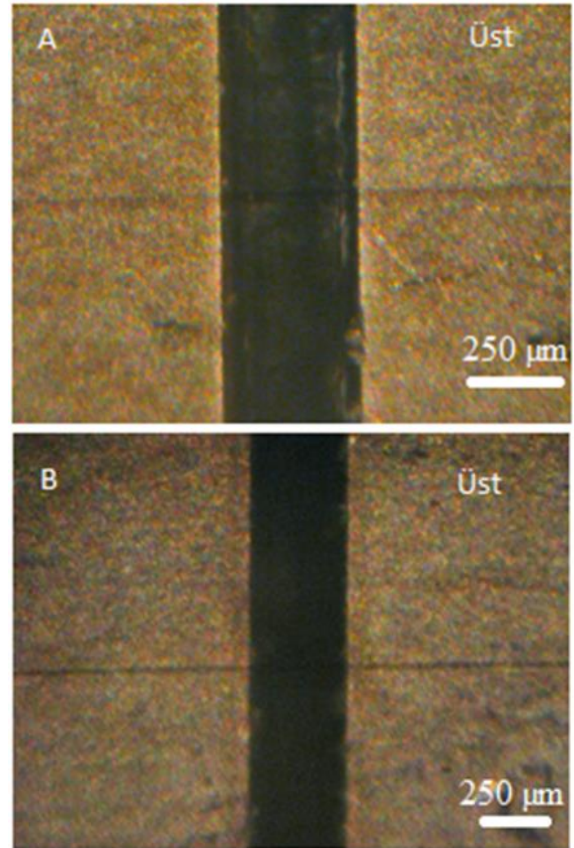
Şekil 8’de numunelerin fiber lazer ışını ile kesme işleminde kullanılan parametrelere bağlı ortalama kerf genişliği değişimleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, gücün artması ve kesme hızının düşmesi ile kerf genişliğinin önemli derecede arttığı gözlenmektedir. Gücün yüksek olduğu durumda, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle yardımcı gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme kaldırılmış olur [14]. Ayrıca, düşük ilerleme değerlerinde birim zamandaki ışının kesme bölgesine etki süresi artacağından dolayı oluşan ısı malzeme yüzeyinde yoğunlaşmakta ve daha fazla hacimde malzeme ergiyerek kerf genişliği artmaktadır. Benzer sonuçlar, Lamikiz vd. [15] ve B. S. Yılbaş[14] tarafından da rapor edilmiştir.



Şekil 8. Parametrelere bağlı kerf genişliğinin değişimi.

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Soy gazlardan argon ve helyum gazlarının titanyum alaşımlarının kesiminde tercih

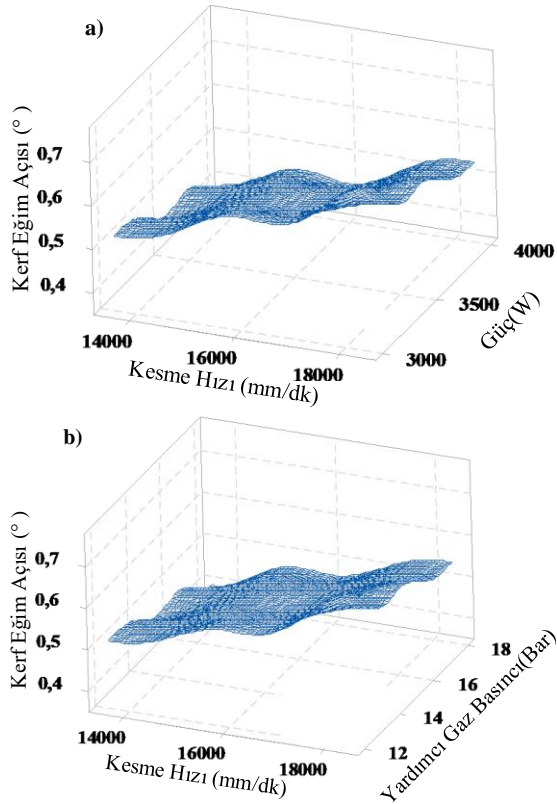
edilmektedir. Bunun sebebi, bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önlemeleridir. Şekil 8-b’de görüldüğü gibi, yardımcı gaz basıncının artmasıyla kerf genişliği artmaktadır. Yüksek güç değerlerinde, oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme uzaklaştırılmış olur ve böylelikle kerf genişliği artar. Numuneler içerisinde en yüksek kerf genişliği hızın en düşük, güç ve basıncın en yüksek olduğu (W=4000 watt, V=13600 mm/dak, P=18 bar) 21 no lu deney de 0,378 mm olarak ölçülmüştür. En düşük kerf genişliği ise hızın en yüksek, güç ve basıncın en düşük olduğu (W=3000 watt, V=18400 mm/dak, P=12 bar) 7 no lu deney de 0,279 mm olarak ölçülmüştür. Bu numunelere ait görüntü Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi (a: 21 nolu deney w=4000watt, v=13600mm/dak, p=18bar b: 7 nolu deney; w=3000 watt, v=18400 mm/dak, p=12 bar.)

### 3.4. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları

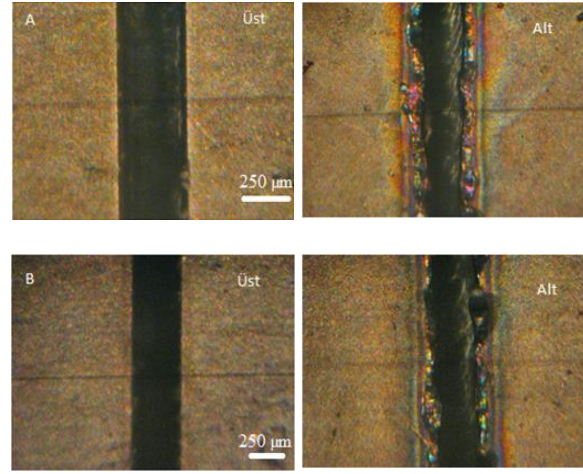
Fiber lazerde kesilen numunelerin alt ve üst kerf genişliği ölçüm sonuçlarında, bütün kesme şartlarında da alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha küçük olduğu ve bu da lazer ışını ile kesmede kesme kanalının konik bir profilde olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Alt ve üst kerf genişliğinde meydana gelen bu değişimin, kesme kalınlığı boyunca ışın yoğunluğunun ve gaz basıncının düşmesi, ışın odağının bozulması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir. Şekil 10' da Ti6Al4V numunelerinin ortalama kerf eğim açısının işlem parametrelerine bağlı değişimlerini gösteren grafikler toplu olarak verilmiştir.



Şekil 10. Parametrelere bağlı kerf eğim açısının değişimi.

Şekil 10'daki grafikler incelendiğinde kesme hızının kerf eğim açısı üzerindeki etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, kerf eğim açısının, artan güç yoğunluğu ve gaz basıncıyla da düştüğü tespit edilmiştir. Lazer ışınının yoğunluğunun, yüksek kesme hızlarında daha da azalması sonucunda parçanın alt kısımlarına doğru ergitilen malzeme miktarı düşer ve alt kerf

genişliğiyle üst kerf genişliği arasında fark oluşur. Ayrıca, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda kerf eğim açısının değeri önemli derecede düşmektedir. Bunun sebebi, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli etkileşim süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaştırmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla da örtüşmektedir[16].



Şekil 11. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi (a: 7 nolu deney; v=18400 mm/dak, w=3000 watt, p=12 bar, b: 21 nolu deney v=13600 mm/dak, w=4000 watt, p=18 bar)

Şekil 11' de lazer ışını ile kesilen numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en düşük ve en yüksek kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En yüksek kerf eğim açısı, kesme hızının en yüksek (18400 mm/dakika), gaz basıncının ve lazer gücünün en düşük (12 Bar, 3000 Watt) olduğu 7. deneyde 0,759° olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama kerf eğim açısı ise, gaz basıncının ve lazer gücünün en yüksek (18 Bar, 4000 W), kesme hızının en düşük olduğu (13600 mm/dk) 21. deneyde 0,372° olarak ölçülmüştür.

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 2mm kalınlığındaki Ti6Al4V titanyum alaşımı plaka, fiber lazer kesim yöntemi ile kesilmiştir. Yapılan deneyler sonunda, işlem parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki



etkileri makro ve mikro düzeyde incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Lazer ışını ile kesilmiş numunelerin yüzey kesitleri incelendiğinde, üç farklı tabakanın oluştuğu görülmüştür. Bunlar; yeniden katılma tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve esas malzemedir. Yeniden katılma tabaka kalınlığı özellikle lazer gücüne bağlı olarak önemli derecede artmakta ve kesme hızının artmasıyla azalmaktadır.
- Ortalama kerf genişliğinin artmasında güç ve hızın etkisi önemli rol oynarken gaz basıncının da kısmen etkili olduğu belirlenmiştir. Kerf genişliği, kesme hızı azalırken güç artışıyla kademeli olarak artmaktadır. Yoğun ısı sonucu ergiyen malzeme, gaz basıncı yardımıyla ortamdan atılarak kerf genişlemesine sebep olmaktadır. Deneyler sonucunda kerf genişlik değerlerindeki değişimlerin güç ve yardımcı gaz basıncı ile doğru, kesme hızı parametresiyle ters orantılı olduğu saptanmıştır.
- Kerf eğim açısı, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda önemli derecede düşmektedir. Bunun nedeni, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli temas süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılma olmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır.

## 5. Kaynaklar

1. Meshram, S.D., Mohandas T. (2010). A comparative evaluation of friction and electron beam welds of near-a titanium alloy. *Mater Design*, **31(22)**:45–52.
2. Varkey, A.P., Kuriakose, S., Unni, V.N. (2014). Optimization of edge quality during CO<sub>2</sub> laser cutting of titanium alloy. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, **1(11)**:110-117.
3. Scintilla, L.D., Palumbo, G., Sorgente, D., Tricarico L. (2013). Fiber laser cutting of Ti6Al4V sheets for subsequent welding operations: Effect of cutting parameters on butt joints mechanical properties and strain behavior. *Materials and Design*, **47**:300–308, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.014>.
4. Pandey, A.K., Dubey, A.K. (2012). Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet. *Opt Laser Technol*, **44(18)**:58–65.
5. Joseph, R. D. (1989). *ASM Metals Handbook. Machining*, 16: 579–587, ISBN: 0871700220.
6. Rao, B.T., Kaul, R., Tiwari, P., Nath, A.K. (2005). Inert gas cutting of Titanium sheet with pulsed mode CO<sub>2</sub> laser. *Optics and Lasers in Engineering*, **43(13)**:30–48.
7. Shanjin, L., Yang, W. (2006). An investigation of pulsed laser cutting of Titanium alloy sheet. *Optics and Lasers in Engineering*, **44(10)**:67–77.
8. Andersson, N., Granberg, C. (2015). Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters Informative. Master thesis. Department of Materials and Manufacturing Technology. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
9. Stelzera, S., Mahrlea, A., Wetziga, A., Beyer, E. (2013). Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO<sub>2</sub> laser beams. *Physics Procedia* **41**:399 – 404
10. Powell, J., Kaplan, A.F.H. (2012). A technical and commercial comparison of fiber laser and CO<sub>2</sub> laser cutting. In: *Proceedings of ICALEO*, 277–281.
11. Sen, A., Doloi, B., Bhattacharyya, B. (2014). Experimental Studies on Fibre Laser Micro-Machining of Ti-6Al-4V, 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), Guwahati, Assam, India.
12. Hamoudi, W.K. (1996). The effects of speed and processing gas on laser cutting of steel using a 2 kW CO<sub>2</sub> laser. *International Journal for Joining of Materials*, **9 (1)**:31–36.
13. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S.H. (2003). CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **43**:351–358.
14. Yilbas, B.S. (2004). Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology* **155**:2106–2115
15. Lamikiz, A, Lacella, L.N.L., Sanchez, J.A., Pozo, D.D., Etayo, J.M., Lopez, J.M. (2005). CO<sub>2</sub> laser cutting of advanced high strength steels (AHSS). *Appl Surf Sci*, **242**:362–8.
16. Powell, J., Al-Mashikhi, S.O., Kaplan, A.F.H., Voisey, K.T. (2011). Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the ‘striation free’ effect. *Optics and Lasers in Engineering*, **49**:1069–1075