



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Titanyum boruların lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve kaynak bölgesinin karakterizasyonu

## *Joining of titanium pipes with laser welding method and characterization of the welding zone*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Erkan UYGUNTÜRK<sup>1</sup>, Nizamettin KAHRAMAN<sup>2</sup>, Ahmet DURGUTLU<sup>3</sup>, Behçet GÜLENC<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-6741-4668

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7152-3795

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-3839-2903

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0001-8434-8183

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article):** Uyguntürk E., Kahraman N., Durgutlu A. ve Güleç B., "Titanyum Boruların Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Karakterizasyonu", *Politeknik Dergisi*, 24(1): 255-262, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.681144

# Titanyum Boruların Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Karakterizasyonu

## Joining of Titanium Pipes with Laser Welding Method and Characterization of the Welding Zone

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Titanyum boruların lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde, lazer ışın gücünün etkisi. / The effect of laser beam power to joining of titanium pipes through laser welding.
- ❖ Uygun lazer kaynak parametrelerinde mekanik özellikleri iyi bağlantıların eldesi. / With suitable laser welding parameters obtaining good mechanical joint properties.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Titanyum borular lazer kaynak yöntemi ile farklı lazer kaynak parametrelerinde birleştirilmiş, kaynaklı bölgeleri karakterize edilmiştir. / Titanium pipes were joined with laser welding method at different welding parameters, and their welded zones were characterized.



Şekil. Kaynaklı numunelerin makro görüntüleri /Figure. Macro images of the welded samples

### Amaç (Aim)

Titanyum boruların birleştirilebilirliğinin araştırılması. / To investigate joinability of titanium pipes.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Titanyum borular lazer kaynağıyla birleştirilmiş, kaynak numunelerine çekme, sertlik ve mikro yapı testleri uygulanmıştır. / Titanium pipes were joined by laser welding, tensile, hardness and microstructure tests were applied to the welded samples.

### Özgünlük (Originality)

Lazer gücünün titanyum boruların kaynağı üzerindeki etkisi. / The effect of laser power on the welding of titanium pipes.

### Bulgular (Findings)

Titanyum boruların birleştirilmesinde yanlış lazer ışın gücü seçiminde kaynak hatalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. / It has been observed that welding defects occur in the incorrect selection of laser beam power in joining titanium pipes.

### Sonuç (Conclusion)

Uygun lazer gücünde yüksek çekme dayanımlı kaynaklı bağlantılar elde edilmiştir. / Joints with high tensile strength at suitable laser power have been obtained.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Titanyum Boruların Lazer Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi ve Kaynak Bölgesinin Karakterizasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Erkan UYGUNTÜRK<sup>1</sup>, Nizamettin KAHRAMAN<sup>2\*</sup>, Ahmet DURGUTLU<sup>3</sup>, Behçet GÜLENÇ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pursaklar İMKB Mesleki ve Teknik Anadolu Meslek Lisesi, Ankara.

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük.

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ankara.

(Geliş/Received : 28.01.2020 ; Kabul/Accepted : 13.03.2020)

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı, titanyum boruların lazer kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasıdır. Kaynak işlemleri üç farklı lazer ışın gücünde (130, 140 ve 160 W) gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri esnasında ilave metal kullanılmış ve boru sabit hızda döndürülerek, torç yatay pozisyonda konumlandırılmıştır. Birleştirme işlemi yapılan titanyum borulara kaynak işlemi sonunda kaynak kalitesini ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, gözle muayene, çekme testi ve sertlik testi yapılmıştır. Ayrıca içyapıdaki kusurların belirlenmesi için kaynak bölgesinin mikroyapı incelemeleri ile SEM (EDS) çalışmaları yapılmıştır.

Çekme testleri sonucunda, düşük lazer gücünde birleştirilen numunelerde kopma kaynak metalinden gerçekleşirken, yüksek lazer gücünde birleştirilen kaynaklı numunede kopma kaynak bölgesi dışından gerçekleşmiştir. Kaynaklı numunelere yapılan sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde, en düşük sertlik değerlerinin ise ana malzemede olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Titanyum, lazer ışın kaynak yöntemi, kaynak metali.

## Joining of Titanium Pipes with Laser Welding Method and Characterization of the Welding Zone

### ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the joinability of titanium pipes with laser beam welding. Welding processes were carried out in three different laser beam power (130, 140 and 160 W). Filler metal was used and during welding, the pipe was rotated at constant speed and the torch was positioned in horizontal position. In order to determine the welding quality and mechanical properties of the titanium pipes which were subjected to joining process, visual inspection, tensile test and hardness test were performed. In addition, microstructural investigations of the weld zone and SEM (EDS) image analyses were performed to determine the defects in the microstructure.

As a result of tensile tests on welded samples, fracture was formed on the welding metal on the samples which were joined at low laser power, whereas at welded sample joined at high laser power, fracture occurs in outside the weld zone. As a result of the hardness tests on the welded samples, the highest hardness values were taken from the weld metal and the lowest hardness values were taken from the base material.

**Keywords:** Titanium, laser beam welding method, weld metal.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle havacılık ve uzay mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Bu nedenle bu malzemelerin yarım yüzyıl boyunca çok çeşitli havacılık, kimya sanayi, denizcilik ve hatta ticari ürünler için teknik olarak üstün ve uygun maliyetli malzemeler olduğu kanıtlanmıştır [4,5]. Ayrıca bu malzemeler yüksek biyouyumluluklarından dolayı tıbbi implantlar için kullanılırken [6,7], üretilebilirlikleri, kaynaklanabilirlikleri ve işlenebilirliklerinin diğer metal alaşımlarına göre daha iyi olduğu için geniş bir kullanım alanına sahiptirler [8]. Titanyum ve alaşımlarının kullanımının artışıyla, bu malzemelerin kaynağı daha

önemli hale gelmiştir [9,10]. Titanyum alaşımlarından imal edilen kontrüksiyonların birçoğunda statik ve dinamik yükleri taşıması için farklı kaynak yöntemleri kullanılır [11]. Ancak bu malzemelerin gazlara karşı duyarlılığı çeşitli kaynak yöntemlerinin kullanılmasını sınırlamakta ve bir dizi ek önlemin alınmasını zorunlu kılmaktadır [12,13]. Titanyum ve alaşımlarının birleştirilmesinde en yaygın olarak kullanılan ergitmeli kaynak işlemleri gaz-tungsten ark kaynağı (GTAW), gaz-metal ark kaynağı (GMAW), plazma ark kaynağı (PAW), lazer ışını kaynağı (LBW) ve elektron ışın kaynağıdır (EBW) [14,15]. Lazer kaynağı; yüksek kaynak ilerleme hızı, çok düşük ısı girdisi, dar kaynak dikisi, küçük ısıdan etkilenen bölge [16], farklı türdeki malzemelerin başarılı kaynağı ve farklı kalınlıkları kaynatabilme özellikleri ile diğer kaynak yöntemlerine göre daha üstündür [17-19]. Kaynak işlemi, dolgu

\*Sorumlu Yazar (Corresponding author)  
e-posta : nkahraman@karabuk.edu.tr

malzemesi kullanmadan veya kullanılarak gerçekleştirilebilir ve yüksek oranda en:boy değişiminde kaynak dikişleri elde edilir [20]. Bu yüzden lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiş malzemelerde çarpılma ve distorsiyon daha azdır [21,22]. Tüm bunlara ilave olarak lazer ışın kaynağı yönteminin otomasyona yatkınlığı, seri imalat koşulları için büyük avantajlar sunmaktadır [23]. Lazer kaynağının başlıca dezavantajları ise çok yüksek yatırım masrafları, sertleştirilebilir malzemelerde son derece sert kaynak dikişi, kullanılan lazerlerin göze veya deriye direkt veya dolaylı olarak temasında ciddi sağlık sorunları oluşturması, özellikle yüksek yansıtma kabiliyetine sahip malzemelerin kaynağında ek tedbirler alınması olarak sıralanmaktadır [17]. Lazer, elektrik enerjisini elektromanyetik enerjiye çeviren elektro-optik bir cihazdır. Lazer ışınının birçok endüstriyel türleri bulunmaktadır. CO<sub>2</sub> lazeri, katı hal (Nd:YAG) lazeri, iyon lazeri, yarı-iletken diyot lazerler, fiber lazerler ve excimer lazeri bunlardan bazılarıdır. Ancak kaynak ve kesme için, CO<sub>2</sub> lazeri ve katı hal (Nd:YAG) lazerleri kullanılmaktadır. Nd:YAG katı hal lazeri metalsel malzemelerin mikro kaynak ve kesme işlemlerinde (0.2-4 mm kalınlıklar için), CO<sub>2</sub> lazeri ise makro ölçüde kaynak ve kesme işlemlerinde (1-15 mm kalınlıklar için) kullanılır. Pratikte ise lazer kaynağı uygulamaları; punta ve nüfuziyet kaynağı olmak üzere iki temel şekilde uygulama alanı bulmaktadır. Bu kaynak yönteminde kaynak yapılan malzemenin cinsine göre koruyucu gaz kullanılabilir [24].

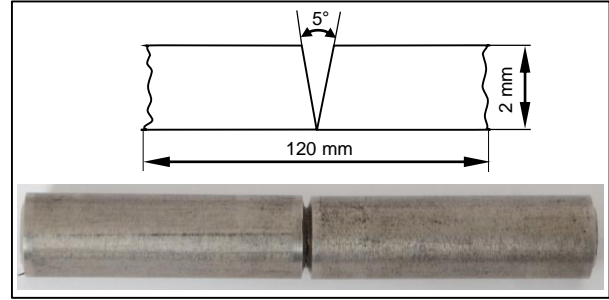
Literatürde titanyum sac malzemelerin ergitmeli kaynak yöntemlerinden TIG kaynağı [25], mikro plazma kaynağı [26], lazer-MIG hibrit kaynağı [27], elektron ışın kaynağı [28,29], lazer ışın kaynağı [18,19,30] ile ilgili çok sayıda çalışmalar mevcuttur. Ancak literatürde boru formundaki titanyum malzemelerin kaynağı oldukça sınırlıdır [31,32]. Ayrıca Ülkemizde titanyum boru malzemelerin lazer kaynağı ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada özellikle uçak pnömatik sistemlerinde sıklıkla kullanılan titanyum boruların lazer ışın kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla titanyum borular farklı lazer güçlerinde, lazer ışın kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve birleştirmelerin kaynak bölgesi farklı testler ile analiz edilmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada ticari amaçla kullanılan 21 mm çapında, 2 mm et kalınlığında ve 60 mm uzunluğunda titanyum borular kullanılmıştır. Kullanılan titanyum boruların kimyasal bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir. Kaynak işlemi öncesinde numunelere Şekil 1’de görüldüğü gibi yaklaşık 5° kaynak ağızı açılmıştır.

**Çizelge 1.** Titanyum boruların kimyasal bileşimi (% ağırlık), (Chemical composition of titanium pipes).

Alaşım elementi	Al	Si	Fe	Zr	Ti
Miktarı (% ağırlık)	2,1848	0,0266	0,0791	2,339	Kalan



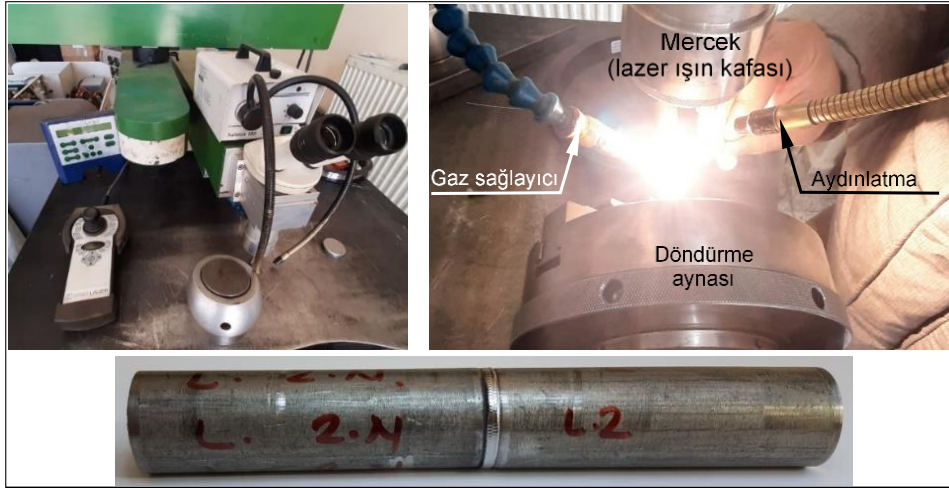
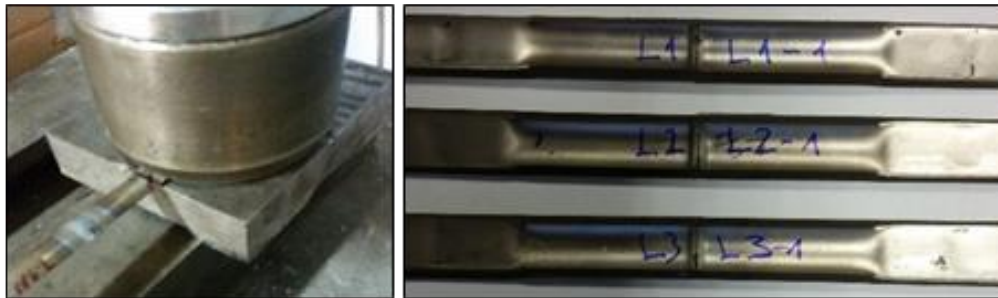
**Şekil 2.** Kaynak ağızı açılmış titanyum borular (Weld groove of titanium tubes).

Kaynak işlemine başlamadan önce titanyum boruların kaynak ile birleştirilecek yüzeyleri ince bir zımparalamadan sonra asetona ile temizlenmişlerdir. Daha sonra borular hassas bir biçimde merkezlenerek dört noktadan punta yardımıyla sabitlenmişlerdir. Puntalanan numuneler Çizelge 2’de verilen parametreler kullanılarak Sigma Laser 400 lazer ışın kaynağı makinesi ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemi esnasında boru içerisinden düşük debili bir argon kök gazı gönderilmiştir. Kaynak işleminde ısı girdisi, El-Batahy’nin [33] östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak bölgesinin şekli ve katılaşması çalışmasında kullandığı formül dikkate alınarak hesaplanmıştır. Kaynak işlemleri esnasında 0,4 mm kalınlığında Grade 2 saf titanyum ilave metal kullanılmış ve kaynak bölgesine manuel olarak beslenmiştir. Birleştirilen tüm numuneler açık havada soğumaya bırakılmıştır. Kaynak işlemlerinin gerçekleştirildiği kaynak makinesi ve kaynak esnasındaki görüntüsü ile kaynak sonrası elde edilen kaynaklı numune görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.

Lazer ışın kaynağı ile birleştirilen numunelere gerekli testleri uygulayabilmek için numuneler tel erozyon yöntemi ile dört eşit parçaya bölünmüşlerdir. Bu yöntem, parçaların kaynak bölgelerinde (kaynak metali ve ITAB) meydana gelebilecek kesme işlemi esnasındaki ısı etkileri ortadan kaldırmak amacıyla tercih edilmiştir. Kesme işlemi sonucu elde edilen dört numuneden 3 tanesi çekme testlerinde bir tanesi ise sertlik ve mikroyapı testlerinde kullanılmıştır. Çalışmada birleştirmelerin göz ile muayene işlemleri TS EN ISO 5817’ye göre yapılmıştır. Çekme testleri, TS EN ISO 4136:2012 standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İlgili standarda göre çekme çenelerinin tutma yerleri pres yardımı ile düzeltilmiştir. Çalışmada kaynaklı numuneler direkt tel erozyon işlemiyle düz halde kesildiği şekliyle teste tabi tutulmuştur. Tel erozyon kesme yöntemi ile dört eşit parçaya bölünen kaynaklı numunelerin çene tutma yerlerinin preste düzeltilmesi esnasındaki ve düzeltme işlemi gerçekleştirilen numunelerin düzeltme sonrası görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Lazer kaynak parametreleri (Laser welding parameters).

	Lazer 1 (L1)	Lazer 2 (L2)	Lazer 3 (L3)
Odak mesafesi (mm)	100	100	100
Lazer gücü P (W)*	130	140	160
Işın çapı (mm)	0,6	0,6	0,6
Darbe gücü (ms)	4,0	4,0	4,0
Kaynak Hızı (mm/sn)	3	3	3
Koruyucu gaz (argon) debisi (l/dk)	14	14	14
Kök gazı (argon) debisi (l/dk)	7	7	7
İlave tel çapı (mm)	0,4	0,4	0,4
Isı girdisi (kJ/mm)**	0,043	0,046	0,053
Paso sayısı	10	10	10
* Kaynak makinasının maksimum gücü 400 W. Kaynak esnasında bunun sırasıyla % 32,5, 35 ve 40'ı kullanıldı. Örnek: P= 400 x % 32,5 = 130 W			
** Q=P/S Burada; Q: Isı girdisi (kJ/mm) P: Lazer gücü (kW) S: Kaynak ilerleme hızı (mm/sn)			

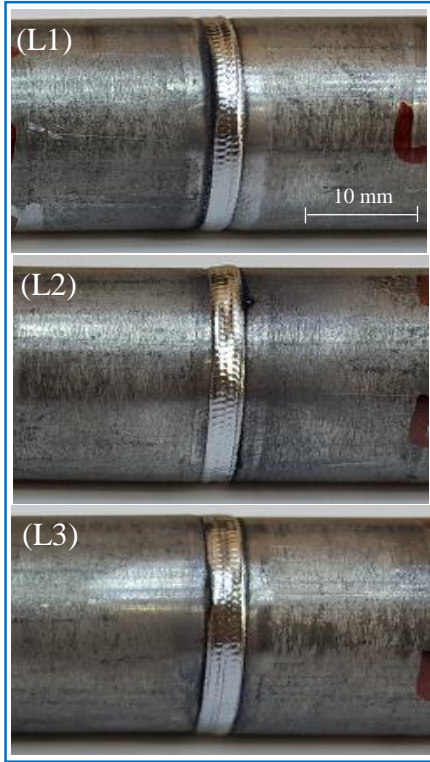
**Şekil 2.** Lazer kaynak makinası, kaynağın yapılışı ve kaynaklı numune (Laser welding machine, welding process and welded sample).**Şekil 3.** Kaynaklı numunelerin çene tutma kısımlarının düzeltilmesi (Flattening of the chin grips of welded samples).

Çekme testi 50 KN kapasiteli SHIMADZU marka çekme test cihazı ile 2 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri SEM yardımıyla kırık yüzey incelemesine tabi tutulmuştur. Kaynaklı birleştirmelerden mikroyapı için hazırlanan numuneler sertlik ölçümleri için kullanılmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 500 gr yük uygulanarak kaynak metaline, ITAB ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde mikro sertlik ölçme cihazında (Qness Q30 M model) yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelere mikroyapı incelemesi yapılabilmesi için, SiC zımpara kâğıdı ile (80, 120, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200) ve elmas pasta ile 3 aşamalı parlatma (6 $\mu$ , 3 $\mu$  ve 1 $\mu$ ) basamakları

takip edilerek numune yüzeyleri hazırlanmıştır. Numunelerden mikroyapı görüntüsü alabilmek için yüzeyler 10 ml HCl, 5 ml HF ve 85 ml saf su ile 20 sn süresince dağlanmıştır. Mikroyapı çalışmaları, Nikon Epiphot 200 optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş titanyum boruların kaynak metaline SEM'de EDS analiz çalışmaları yapılmıştır. Çalışmalar CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM cihazında gerçekleştirilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Gözle muayene çok basit bir yöntem olarak görünse de, genellikle bir başka tahribatsız muayene yönteminden önce yapılması gereken bir çalışmadır. Titanyum boruların lazer ışın kaynağı ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirildiği çalışmalar sonucu elde edilen kaynaklı bağlantıların makro görüntüleri Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Kaynaklı numunelerin makro görüntüleri (Macro images of the welded samples).

Kaynaklı numunelerin göz ile muayene işlemleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, birleştirilmiş numunelerin kaynak kepleri doğrudan muayene edilirken, ikinci aşama kaynak kökü incelemesi için numuneler tel erozyon ile dört eşit parçaya bölündükten sonra gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumları incelenmiş ve kaynak köklerinde kısmi nüfuziyetsizlik hatasının olduğu gözlemlenmiştir. Aynı numunelerin kaynak kepinde ise herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Kaynaklı birleştirmeler üzerinde yapılan ölçümlerde, numunelerin kaynak genişliklerinin yaklaşık 2-2.5 mm aralığında olduğu ve artan ısı girdisine bağlı olarak arttığı görülmüştür.

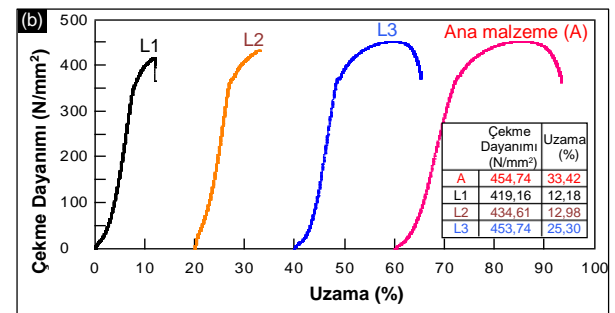
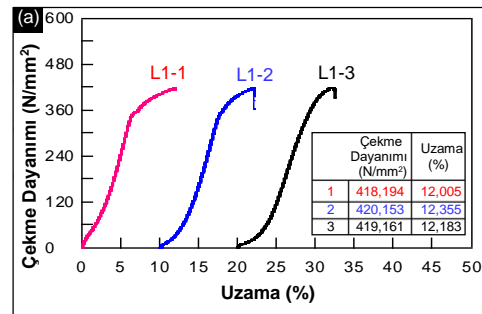
Titanyum malzemelerin kaynağında kaynak metalinde meydana gelen farklı renkler, kaynağın kalitesi hakkında fikir sahibi olunmasını, hatta renk değişimine göre kaynakların kabul ve reddedilebileceğini işaret etmektedir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Titanyum kaynağının renk değerlendirilmesi (Color assessment of titanium welding).

Renk	Kaynak kalitesi	Karar
Gümüş parlaklığı	Mükemmel	Kabul
Saman sarısı	İyi	
Altın sarısı	İyice	
Koyu mavi	Kötü	Red
Mat gri	Çok kötü	

Şekil 4’de verilen kaynaklı numunelerin kaynak metalleri ve ITAB’ları incelendiğinde tamamının gümüş parlaklığı renginde ve “mükemmel” kaynak kalitesi seviyesinde olduğu görülmektedir. Carvalho ve arkadaşları [31], titanyum malzemeleri hem lazer hem de TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı numuneleri görsel olarak kıyaslamışlardır. Çalışmalar sonucunda lazer kaynaklı numunelerde yeterli bir gaz koruması olduğunu gösteren gümüş renkli ve pürüzsüz bir yüzey olduğunu rapor etmişlerdir.

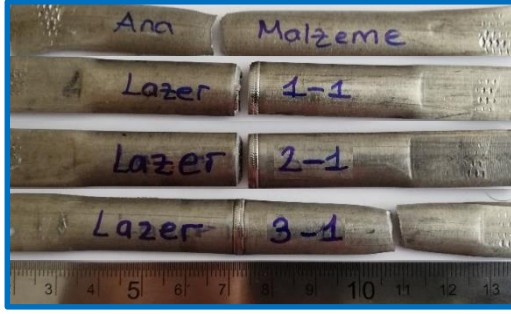
Kaynaklı numunelerin statik yükler altındaki dayanımını belirlemek için kaynaklı numunelere üçer adet çekme deneyi yapılmış ve Şekil 5a’da örnek olması açısından en düşük parametrede birleştirilmiş kaynaklı numunenin (L1), Şekil 5b’de ise kaynaklı numunelerin tamamı (üç çekme sonucunun ortalaması) ile ana malzemenin çekme grafikleri verilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı ve ana malzemenin çekme test grafikleri (Tensile test graphics of welded specimens and base material).

Şekil 5a’da verilen grafikler incelendiğinde birbirine yakın çekme ve uzama değerleri elde edilmiş olup bu da boru malzemenin her yerinde aynı kalitede kaynaklı birleştirme yapılmış olduğunu göstermektedir. Şekil 5b’de verilen çekme grafikleri incelendiğinde L1 ve L2 kodlu numuneler benzer bir çekme davranışı gösterirken, aynı şekilde L3 ve ana malzeme de birbirine benzer çekme davranışı göstermiştir. Bu durumu açıklayabilmek

için Şekil 6'da kaynaklı malzemelerin çekme testi sonrası kopma görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 6.** Kaynaklı numunelerin çekme testi sonrası kopma bölgeleri (Fracture zone after tensile testing of the welded samples).

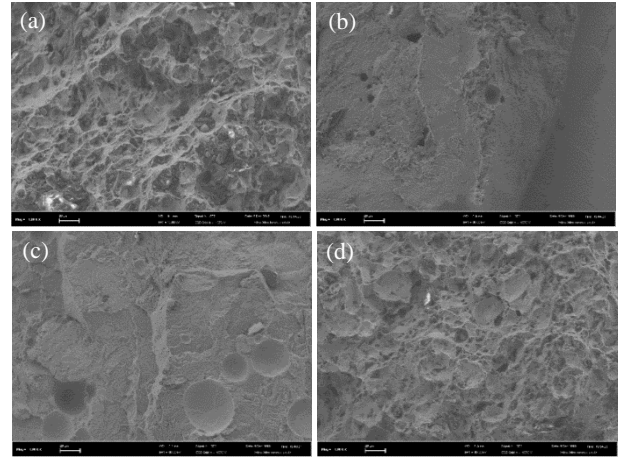
Şekil 6'da üç farklı kaynak parametresinde birleştirilmiş numunelerin çekme deneyi sonucu elde edilen görüntülerine bakıldığında L1 ve L2 kodlu numunelerin kaynak bölgelerinden koptuğu, L3 kodlu numunenin ise ana malzemedan koptuğu görülmektedir. Bu yüzden L3 kodlu numune ile ana malzemenin çekme davranışı benzer sonuçlar ortaya koymuştur.

Kaynak metalinden ve düşük çekme yüklerinde kopan numunelerin yanlış ilave metal seçimi ve yetersiz/fazla kaynak parametrelerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu durumda kopmaların birinin olumlu (ana malzemedan), ikisinin olumsuz (kaynak metalinden) olması, her üç birleştirmede aynı ilave metalin kullanılmış olması dolayısıyla, ilave metal seçiminin en azından yanlış olmadığına bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Çekme test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde L1 ve L2 kodlu numunelerin birleştirilmesinde tercih edilen kaynak parametrelerinin yetersiz oluşu ve bu nedenle yeterli kök oluşumunun gerçekleşmemesi nedeni ile kopmalar kaynak metalinden oluşmuştur. Bu durum aşağıda makro/mikroyapı değerlendirilmesi kısmında verilen fotoğraflardan görülebilmektedir.

Çekme deneyleri sonucu elde edilen % uzama değerlerine bakıldığında (Şekil 5), L1 ve L2 kodlu numuneler düşük % uzama değerleri (ana malzemeye göre yaklaşık % 60 düşük) sergilerken L3 kodlu numunenin ana malzemeye daha yakın (ana malzemeye göre yaklaşık % 30 düşük) bir uzama sergilediği görülmektedir. L1 ve L2 kodlu numunelerde kopma kaynak metallere gerçekleşmiş ve kaynak metalleri yeterince uzama sergilememiştir. L3 kodlu numune, ana malzemedan kopmuş olduğundan belirgin bir uzama değerine ulaşmıştır. Burada kaynak metalinden kopan numunelerden ziyade, ana malzemedan kopan numunedeki uzamanın orijinal titanyum malzemeye göre belirgin bir düşüş göstermesidir. Bunun sebebi; kaynak bölgesindeki yüksek sıcaklıktan dolayı meydana gelen değişim ve dönüşümler bu bölgenin sertliğinin artmasına, dolayısıyla da çekme esnasında bu bölgedeki dislokasyon yoğunluğunun uzamaya fırsat vermemesine neden olmaktadır. Carvalho ve arkadaşları [31] Grade 2 saf titanyum boruları hem lazer hem de TIG kaynağı ile

birleştirmişler ve çekme testi esnasında numunelerin kopmadan önce boyun verdiğini ve sünek kırılma tipi sergilediklerini, Palanivel ve arkadaşları [32] aynı malzemeleri farklı kaynak hızlarında lazer kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve düşük kaynak hızında birleştirilen (2.50m/dk) numune ergime bölgesinde iri tanelerden dolayı büyük boşlukların ve gözeneklerin oluştuğu, bu yüzden de kesit alanının azaldığı kaynak metalinden koptuğunu, diğerlerinde ise kopmanın kaynak metali dışından olduğunu ve kaynak hızındaki artışın, kırılma modunu gevrekten süneğe değiştirdiği rapor etmişlerdir. Yine Palanivel ve arkadaşları ise [34] Grade 2 titanyum boruları sürtünme ve lazer kaynak yöntemleri ile birleştirmişler ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin ergime bölgesinde hızlı soğuma nedeniyle alt tane sınırlarının oluştuğunu bu sınırların dislokasyon hareketlerinin önünde bir engel oluşturduğunu ve bu nedenle de mekanik özelliklerin attığını rapor etmişlerdir. Bu güçlendirme mekanizması sayesinde lazer kaynaklı numunelerin ana malzemedan koptuğunu ve ergime bölgesinde önemli bir gözenek görülmezken, ana malzemenin sünek kırılmasına sebep olduğunu rapor etmişlerdir.

Çekme testi sonucunda oluşan kırık yüzey morfolojileri SEM'de incelenerek değerlendirilmiştir. Şekil 7'de ana malzeme ile kaynaklı numunelerin kopma yüzeylerinden elde edilen görüntüler verilmiştir. Burada a ve d kırık yüzey görüntüleri ile b ve c kırık yüzey görüntülerinin kendi aralarında birbirlerine benzedikleri görülmektedir.

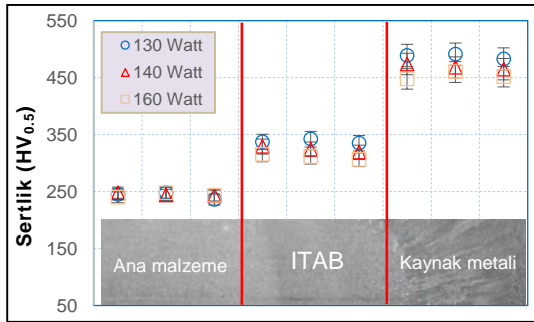


**Şekil 7.** Kırık yüzey görüntüleri; a) Ana malzeme, b) L1, c) L2 ve d) L3 (Fractured surface images a) base materials, b) L1, c) L2 and d) L3).

L1 ve L2 numunelerinde tane içi kırılmaların yoğunlukta olduğu için klivaj düzlemlerin oluştuğu ve dolayısıyla da kırılmanın gevrek tipte olduğu görülmektedir. Ayrıca kaynak metalinde iri taneli yapıdaki boşlukların birleşmesiyle gevrek kırılma sergilediği söylenebilir. L3 numunesindeki kopma yüzeyi incelendiğinde ise ana malzeme kırık yüzeyi ile aynı sünek kırılma davranışı sergilediği görülmüştür. L3 numunesinde ısı girdisinin yüksek olması bu numunede kaynak sonrası soğuma hızını azalttığından kopma kaynak bölgesi dışından ve sünek olarak gerçekleşmiştir. Köse ve Karaca [21], Ti6Al4V alaşımının fiber lazer kaynak kabiliyetini

araştırmışlar ve bazı numunelerde kırılma biçiminin sünek, bazılarının ise klivaj kırılmayla birlikte tanelerarası gerçekleştiğini, Palanivel ve arkadaşları [32], ise Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirdikleri titanyum boru malzemelerin kırık yüzeylerinin küçük tane boyutunun peteksi bir doku nedeniyle sünek kırılma sergilediklerini rapor etmişlerdir.

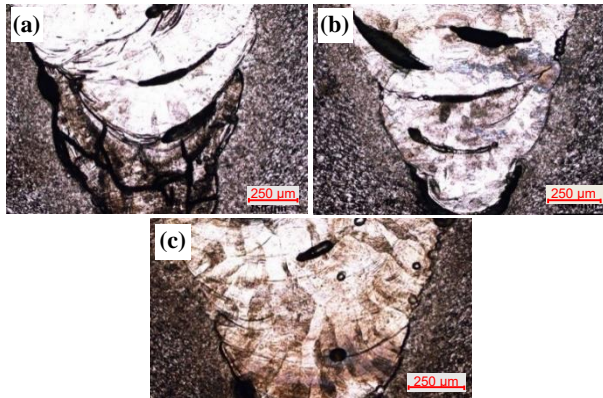
Farklı lazer güçlerinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinden alınan sertlik değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Burada en yüksek sertliklerin kaynak metallere, en düşük sertliklerin ise ana malzemede olduğu açıkça görülmektedir. ITAB’dan ölçülen sertlik değerleri ise orta bir değerde olup, 275-350 HV aralığında bulunmuştur.



Şekil 8. Sertlik ölçüm sonuçları (Hardness measurement results).

Parametrelere bağlı olarak kaynak bölgesine uygulanan ısı girdisinin etkisi sonucu kaynak bölgesinin yavaş soğumasıyla sertlikte buna bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Dikbaş ve Katı [35] Ti6Al4V alaşımını plazma ark kaynak yöntemi, Wang ve arkadaşları [36] TA15 Ti-alaşımını karbondioksit lazer kaynak yöntemi ve Fraga ve arkadaşları [37] Grade 2 saf titanyum malzemeleri hem TIG hem de lazer kaynağı ile birleştirmişler kaynak metalinin yüksek sertliğe sahip olduğunu, bitişik olan ısı tesiri altında kalan bölgede ise sertliğin hızla düştüğünü ve ana malzemenin en düşük sertliğe sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

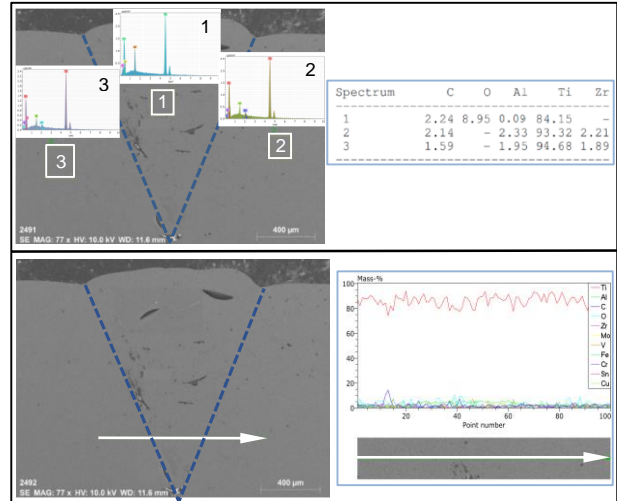
Yapılmış olan çalışmadan elde edilen numunelerin kaynak bölgesini karakterize edebilmek için optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiş olup görüntüler Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Kaynaklı numunelerin makro/mikroyapıları (Macro/microstructures of the welded samples).

Şekil 9’da verilmiş olan makro/mikro fotoğraflar incelendiğinde kaynak metali içerisinde, özellikle kaynak pasoları arasında kısmi olarak birleşme hatalarının olduğu ve bu hataların en düşük değerlerdeki kaynak parametrelerinde daha fazla olduğu, parametre değerlerinin artışıyla bağlı olarak bu hataların da azaldığı görülmektedir. Meydana gelen bu hataların, çekme deneyleri esnasında numunelerin kaynak metalinden kopmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kaynak metallere oluşmuş olan tane yapısının da ana malzemenin tane yapısından çok daha iri bir halde olduğu ve tane sınırlarının düzensiz, tırtıklı bir halde meydana geldiği yine bu görüntülerden anlaşılabilir. Palanivel ve arkadaşları [32], titanyum malzemelerin lazer ışın kaynağı ile birleştirilmesi çalışmalarında, kaynak metallere oluşan tane sınırlarının tırtıklı ve düzensiz bir şekilde bir arada bulunduğu bahsedilmesi, yapılan bu çalışmayı desteklemektedir. Kaynak parametrelerinin yüksek olarak seçildiği L3 numunesinin kaynak metaline bakıldığında oluşan tanelerin kaynak metali merkezine doğru bir yönelme eğiliminde olduğu bunun da ısı akış yönünün tersi olarak olduğu görülebilmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen numunelerin kaynak metallere analizi gerçekleştirilmiş ve ana malzeme ile kullanılan ilave metalin birleşimi sonucu oluşan kaynak metalinin kimyasal kompozisyonu belirlenmeye çalışılmıştır. Aşağıda orta değerdeki parametreler kullanılarak (L2) elde edilen numuneye ait değerler verilmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. L2 numunenin EDS analiz sonuçları (EDS analysis results of L2 sample).

Şekil 10’da verilen sonuçlar incelendiğinde 1 nolu kaynak metalinde eser miktarda alüminyuma (0.09 Al) rastlanırken, ana malzemede mevcut olan Zr elementine rastlanılmamıştır. Kaynak metalinde (1 nolu alan) ana malzemede mevcut olan Al ve Zr elementlerine burada rastlanılmamasının sebebi olarak lazer kaynak işleminin çok pasolu olarak gerçekleşmesi gösterilebilir. Dolayısıyla çok pasolu kaynaklarda ana malzemeye yakın bölgelerde (ergime sınırı) kaynak metali yapısı ana malzeme ve ilave metal karışımından olurken orta



pasalarda ağırlıklı olarak ilave metalden oluşmaktadır. Çizgisel analiz grafiği incelendiğinde ise ana malzemede titanyum matris elementin yanında normal miktarda Al ve Zr görülürken, kaynak metaline gelindiğinde Al ve Zr miktarının bir miktar azaldığı görülmektedir. Alan analizinde görülmeyip çizgisel analizde kaynak metalinde Al ve Zr görülmesinin sebebi; çizgisel analizin kaynak merkezinden ziyade kaynak köküne yakın bölgeden yapılmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Farklı lazer güçlerinde birleştirilen titanyum boruların kaynak bölgelerinin çekme testi, sertlik testi ve mikroyapı çalışmalarıyla karakterize edildiği bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✓ Göz ile yapılan muayene sonucunda tüm numunelerde kaynak metal ve ITAB renklerinin gümüş parlaklığı renklerinde (kaynak kalitesi mükemmel) oldukları görülmüş olup, kaynaklı numunelerde kabul edilemez gri renk gözlenmemiştir.
- ✓ Kaynaklı numunelere uygulanan göz ile muayene sonucunda birleşme yüzey hatalarına (gözenek, yenme olukları, eksik/fazla dikiş yüksekliği, makro çatlak vb) rastlanılmamıştır. Ancak kaynak kökleri incelendiğinde ise düşük lazer gücünde birleştirilen numunelerde kısmi nüfuziyetsizlik hatasının oluştuğu görülmüştür.
- ✓ Çekme testleri sonucunda en yüksek lazer gücünde birleştirilen numunede kopma ana malzemeden, diğer iki numunede ise kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Ana malzemeden kopan numunenin, orijinal ana malzeme ile aynı çekme dayanımı sergilediği ve kırılma yüzeylerinin, kopma öncesinde büyük plastik deformasyona maruz kaldığını gösteren çok sayıda çukurcuğun oluştuğu görülmüştür.
- ✓ Yapılan sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metallere olduğu ve bu değerlerin ana malzemeye doğru gidildikçe azaldığı görülmüştür.
- ✓ Elde edilen makroyapı görüntülerinden birleştirmelerdeki ITAB'ların dar bir alanda oluştuğu ve kaynak metallere düzensiz sınırları olan (yüksek ısı girdisi etkisi ile) büyük tanelerden meydana geldiği tespit edilmiştir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lina J., Mab N., Liu X., Leia Y., "Modification of residual stress distribution in welded joint of titanium alloy with

multi electron beam heating", *Journal of Materials Processing Tech.* 278: 116504, (2020).

- [2] Henriques V. A. R., Campos P. P., Cairo C. A. A., Bressiani J. J., "Production of titanium alloys for advanced aerospace systems by powder metallurgy", *Materials Research*, 8(4): 443-446, (2005).
- [3] Yang X., Li W., Fu Y., Ye Q., Xu Y., Dong X., Hu K., Zou Y., "Finite element modelling for temperature, stresses and strains calculation in linear friction welding of TB9 titanium alloy", *Journal of Materials research and Technology*, 8(5): 4797-4818, (2019).
- [4] Lia J. N., Lib J. S., Qi W. J., Liu K. G., "Characterization and mechanical properties of thick TC4 titanium alloy sheets welded joint by vacuum EBW", *Vacuum* 168, 108812, (2019).
- [5] Lu L., Li J., Su C. Y., Sun P. Y., Chang L., Zhou B. B., He X. H., Zhou C. Y., "Research on fatigue crack growth behavior of commercial pure titanium base metal and weldment at different temperatures", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100: 215-224, (2019).
- [6] Szusta J., Tüzün N., Karakaş Ö., "Monotonic mechanical properties of titanium grade 5 (6Al-4V) welds made by microplasma", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 100: 27-38, (2019).
- [7] Subaşı, M., Karataş, Ç., "Titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme", *Politeknik Dergisi*, 15(2), 87-103 (2012).
- [8] Uzun, R. O., Durmuş, H., Meriç C., "CO2 lazer kaynağıyla birleştirilmiş Ti64 titanyum alaşımının optimum kaynak şartlarının belirlenmesi", *SMYO Teknik Bilimler Dergisi*, 1-10 (2006).
- [9] Kaya Y., Kahraman N., "Titanyum sacların nokta direnc kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi", *Politeknik Dergisi*, 14(4): 263-270, (2011).
- [10] Lee W. B., Lee C. Y., Chang W. S., Yeon Y. M., Jung, S. B., "Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", *Mater. Lett.* 59(26): 3315-3318, (2005).
- [11] Liu H., Wang H., Zhang Z., Liu Y., Huang Z., Wang Q., Chen Q., "Tensile and fatigue behavior of electron beam welded TC17 titanium alloy joint", *International Journal of Fatigue*, 128, 105210, (2019).
- [12] Şirin S. Y., Sarı N. Y., Kaluç E., Titanyum ve alaşımlarının kaynağı 1, *Makine Magazin*, 19: 62-70, (1997).
- [13] Kaya Y., Durgutlu A., Kahraman N., Gülenç B., "Titanyum levhaların TIG kaynağı ile birleştirilmesinde akım türünün mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi", *International Advanced Technologies Symposium (IATS '11)*, Elazığ, 288-293, (2011).
- [14] Sagar D. B. A., Vikas B., Saha B., Narasaiah N., Jayapal P., Ram G. D. J., Rao M. S. K., "Study of microstructure and mechanical properties of friction welded metastable beta titanium alloy titan 1023", *Materials Today: Proceedings* 5: 20760-20768, (2018).
- [15] Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G., "Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti-6Al-4V using lanthanated tungsten tool", *Materials Characterization*, 139: 328-336 (2018).

- [16] Köse, C., Karaca, E., "Ti6Al4V alaşımının fiber lazer kaynak kabiliyeti", *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 12(3), 140-152 (2017).
- [17] Aydın K., Karaağaç, İ., "Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları", *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2): 693-705, (2018).
- [18] Pei-quan X., "Microstructure characterization of Ti-6Al-4V titanium laser weld and its deformation", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22:2118-2123(2012).
- [19] Logesh M., Selvabharathi R., Thangeeswari T., Palani S., "Influence of severe double shot peening on microstructure properties of Ti 6Al-4V and Titanium Grade 2 dissimilar joints using laser beam welding", *Optics and Laser Technology*, 123: 105883, (2020).
- [20] Özcan, M., Tarakcıoğlu, N., Kahramanlı, Ş., "Sac malzemelerin lazer kaynak parametreleri", *Selçuk Teknik Dergisi*, 3(1): 14-25 (2004).
- [21] Liu H., Shui J., Cai T., Chen Q., Song X.G., Yang G.J., "Microstructural evolution and hardness response in the laser beam welded joints of pure titanium during recrystallization and grain growth", *Materials Characterization*, 145: 87-95, (2018).
- [22] Dhinakaran V., Shriragav S. V., Fahmidha A. F. Y., Ravichandran M., "A review on the categorization of the welding process of pure titanium and its characterization", *Materials Today: Proceedings* (Article in press).
- [23] Ertem R. U., "Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak parametre değişimlerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi", *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma*, 31: 583-593, (2013).
- [24] Kahraman, N., Gülenç, B., "Modern Kaynak Teknolojisi", *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti*, Ankara, 210-218, (2020).
- [25] Bendikiene R., Baskutis S., Baskutiene J., Ciuplys A., Kacinskas T., "Comparative study of TIG welded commercially pure titanium", *Journal of Manufacturing Processes*, 36: 155-163, (2018).
- [26] Kumar A. S., Rao T. V. H., Kesava Rao V.V.S., RamaKanth R.T., "Optimizing pulsed current micro plasma arc welding parameters to maximize ultimate tensile strength of titanium (Ti-6Al-4V) alloy using Dragon fly algorithm", *Materials Today: Proceedings*, (Article in press).
- [27] Huang A., Zhang J., Gao C., Hu R., Pang S., "Effects of groove constraint space on plasma characteristics during Laser-MIG hybrid welding of Titanium alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, 48: 137-144, (2019).
- [28] Gao F., Yu W., Song D., Gao Q., Guo L., Liao Z., "Fracture toughness of TA31 titanium alloy joints welded by electron beam welding under constrained condition", *Materials Science & Engineering A*, 772: 138612, (2020).
- [29] Liu H., Wang H., Zhang Z., Huang Z., Liu Y., Wang Q., Chen Q., "Enhancing the mechanical properties of electron beam welded TC17 titanium alloy joint by post-weld heat treatment", *Journal of Alloys and Compounds*, 810: 151937, (2019).
- [30] Sorensen D., Pischlar J., Stevick J., Hintsala E., Stauffer D., Myers J.C., Keenan T., Ramirez A.J., "Investigation of a dissimilar vitreloy 105 to grade 2 titanium laser Weld", *Materials Science and Engineering A*, 742, 33-43, (2019).
- [31] Carvalho, S., Dinaharan, I., Laubscher, R., "Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems", *International Journal of Fatigue*, 90, 47-56 (2016).
- [32] Palanivel, R., Dinaharan, I., Laubscher, R., "Microstructure evolution and mechanical characterization of Nd:YAG laser beam welded titanium tubes", *Materials Characterization*, 134: 225-235 (2017).
- [33] El-Batahgy A. M., "Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels", *Materials Letters*, 32: 155-163, (1997).
- [34] Palanivel, I., Dinaharan, R. F., Laubscher, R., "A comparative study on microstructure and mechanical properties between friction and laser beam welded titanium tubes" *Optik*, 177: 102-111 (2019).
- [35] Dikbaş, H., Katı, N., Ti6Al4V alaşımının PTA kaynağında 1800 W kaynak gücünde birleştirilebilirliğin araştırılması", *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, 6(1): 19-30 (2015).
- [36] Wang K., Liu, G., Yuan, S., "Deformation behaviour of laser-welded tube blank of TA15 Ti-alloy for gas forming at elevated temperature", *MATEC Web of Conferences*, 21: 06005, 1-6, (2015).
- [37] Fraga, A. F., Santos, M. L., Almeida, F. E., Guastaldi, A. C., "A comparative study of TIG and laser welded joints using commercial purity titanium used in prostheses supported by implants", *Welding International*, 22(12): 834-839, (2008)