



**LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI  
TÜRDEKİ YÜKSEK/ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ  
ÇELİKLERDE MEKANİK VE MİKROYAPI  
İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ  
OĞuz TUNÇEL**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI TÜRDEKİ  
YÜKSEK/ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE MEKANİK VE  
MİKROYAPI İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Oğuz TUNÇEL  
ORCID: 0000-0002-6886-6367

Doç. Dr. Hakan AYDIN  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

## TEZ ONAYI

Oğuz TUNÇEL tarafından hazırlanan "LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI TÜRDEKİ YÜKSEK/ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE MEKANİK VE MİKROYAPI İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Hakan AYDIN

- Başkan** : Doç. Dr. Hakan AYDIN  
ORCID: 0000-0001-7364-6281  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Doç. Dr. Yakup AYKUT  
ORCID: 0000-0002-5263-1985  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr.Üyesi Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN  
ORCID: 0000-0003-1739-1143  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr.Üyesi Celalettin YÜCE  
ORCID: 0000-0003-1387-907X  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr.Üyesi Kemal DAVUT  
ORCID: 0000-0002-9860-881X  
Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

İmza

İmza

İmza

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü  
43/02/2020

43/02/2020

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**13/03/2020**

**Oğuz TUNÇEL**

## ÖZET

Doktora Tezi

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI TÜRDEKİ YÜKSEK/ULTRA YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE MEKANİK VE MİKROYAPI İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Oğuz TUNÇEL**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Hakan AYDIN

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde Ar-Ge çalışmaları genel itibariyle araç hafifletme üzerine yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda, otomotiv sektörü daha hafif tasarımlara olanak sağlayacak ultra yüksek mukavemetli çelik sacları otomobil yapısal bileşenlerinde, yan darbe kırımlarında ve tamponlarda kullanmaya başlamıştır. Gün geçtikçe de bu çeliklerin otomotiv endüstrisindeki kullanımları artmaktadır. Kullanımı giderek artan bu çeliklerin kaliteli bir şekilde birleştirilmesi önemli bir araştırma konusudur.

Lazer kaynağının endüstriyel imalattaki önemi hassas ve yüksek kalitede birleştirme sağladığı için giderek artmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemleriyle kıyaslandığında lazer kaynağının üstünlüğü yüksek ısı yoğunluğu ve ışın odaklanma çapının düşük olması esasına dayanır. Bu da, kaynak ısısından etkilenen alanın daha dar olması anlamına gelmektedir. Bu anlamda daha düşük ısı girdisi, daha düşük kalıntı gerilmeler ve çarpılmalar, yüksek kaynak hızı, derin nüfuziyet, kusursuz kaynak profili, yüksek yapısal dayanım, estetik açıdan güzel görünüm, taşlama gerektirmemesi, yüksek derinlik genişlik oranına sahip dar kaynak dikişi, otomasyona uygunluk lazer kaynağının sağladığı öncelikli avantajlar arasında sayılabilir.

Günümüzde kullanılan tüm kaynak yöntemlerinde kaynak bölgesinde ve çevresinde istenmeyen mukavemet düşüşleri meydana gelmektedir. Kaynak kalitesinin istenen seviyede olabilmesi ancak uygun kaynak parametrelerini seçimiyle mümkün olabilmektedir. Tez kapsamında, otomotiv endüstrisine yönelik ultra yüksek mukavemetli DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 çeliklerinin lazer kaynağı ile birleştirmelerinde kaynak parametreleri, mikro yapı, mekanik özellikler ve kırılma özellikleri arasındaki ilişkilerin deneysel olarak ortaya konulup otomotiv sektöründeki uygulamada kullanılabilecek lazer kaynak parametre aralığının (veya parametreleri) belirlenmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaynağı, ultra yüksek mukavemetli çelikler, kaynak parametreleri, mikro yapı, mekanik özellikler, kırılma özellikleri  
**2020, xv + 220 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc/PhD Thesis

### THE INVESTIGATION OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURE RELATION BETWEEN LASER WELDED DIFFERENT TYPES HIGH AND ULTRA HIGH STRENGTH STEELS

**Oğuz TUNÇEL**

Bursa Uludag University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Hakan AYDIN

In recent years, in the automotive industry R&D activities are generally focused on vehicle weight reduction. For this reason, the automotive sector has begun to use ultrahigh strength steel sheets in automotive structural components, side impact beams and bumpers that will allow for lighter designs. The use of these steels in the automotive industry is increasing day by day. And, its important research topic to joining these steels with high quality.

The importance of laser welding in industrial manufacturing has been increasing, as it provides a precise and high quality joint. Compared to conventional welding methods, the superiority of the laser welding is based on the principle of high energy density and low beam focusing diameter. This means a narrower area affected by welding heat. In this sense, low heat input, lower residual stresses and distortions, high welding speed, deep penetration, perfect welding profile, high structural strength, aesthetically pleasing appearance, no grinding requirement, narrow weld seam with high depth / width ratio and suitability for automation are among the primary advantages that the laser welding provides.

In all current welding methods, undesirable strength decreases occur in the weld zone and its around due to the applied welding methods. The welding quality can only be achieved at the desired level by selecting appropriate welding parameters. In the thesis, the relationship between microstructure, mechanical and fracture properties of selected ultrahigh strength steel sheets (DP800, DP1000, DP1200 and Usibor 1500 steels) according to their welding parameters will be determined and the laser welding parameter range (or parameters) that can be used in the automotive sector will be determined.

**Key words:** Laser welding, ultrahigh strength steel, weld parameters, microstructure, mechanical properties, fracture properties

**2020, xv + 220 pages.**

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü öğrenim hayatım boyunca bilgi birikiminden faydalandığım, akademik olarak bana örnek teşkil eden ve yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Hakan AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Ali BAYRAM ve Doç. Dr. Yakup AYKUT'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez konumuyla alakalı yürütülen BAP projesinde araştırmacı olarak beraber çalıştığımız, bilgi birikim ve tecrübeleriyle yol gösteren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Kemal DAVUT'a teşekkür ederim.

Fiber lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Coşkunöz Holding'e teşekkür ederim.

Nd:YAG lazer kaynak işlemlerinde yardımlarından dolayı Lazermik Kaynak ve Markalama firmasına teşekkür ederim.

Lazer kesim işlerinde yardımcı olan Körüstan Bursa Sac-Pres San. ve Tic. A.Ş.'ye ve yardımlarından dolayı Cem KÖRÜSTAN'a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamı 2211/C Öncelikli Alanlara Yönelik Burs Programı kapsamında bursiyer olarak destekleyen TÜBİTAK kurumuna şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmalarımı OUAP (MH)-2019-6 nolu orta ölçekli bilimsel araştırma projesi ile destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen, varlıklarını her an yanımda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarım boyunca her zaman desteğini yanımda hissettiğim nişanlım Dilek TOPRAK'a teşekkür ederim.

Oğuz TUNÇEL  
13/03/2020

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Taşıt Hafifletme Stratejisi .....	5
2.2 Çift Fazlı Çelikler.....	9
2.3 Usibor 1500 Çeliği .....	14
2.4 Lazer Teknolojisi .....	17
2.5 Lazer Kaynağı .....	21
2.5.1 Nd:YAG Lazer Kaynağı .....	24
2.5.2 Fiber Lazer Kaynağı.....	26
2.6 Lazer Alın Kaynağı.....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	32
3.1 Materyal .....	32
3.2 Deney Parametreleri.....	33
3.3 Lazer Kaynak Cihazları.....	36
3.4 Metalografik Muayene Numunesi Hazırlama İşlemleri.....	39
3.5 Optik Mikroskop Çalışmaları.....	40
3.6 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	40
3.7 Çekme Testleri .....	41
3.8 SEM Analizleri.....	42
3.9 EBSD Analizleri.....	42
4. BULGULAR .....	44
4.1 DP800-DP800 Nd:YAG Lazer Kaynaklı Numuneler.....	44
4.1.1 İy yapı İncelemeleri.....	45
4.1.2 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	64
4.1.3 Çekme Testleri .....	75
4.1.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	83
4.2 DP800-DP800 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler .....	86
4.2.1 İy yapı İncelemeleri.....	86
4.2.2 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	101
4.2.3 Çekme Testleri .....	109
4.2.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	113
4.3 DP1000-DP1000 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler .....	115
4.3.1 İy yapı İncelemeleri.....	115
4.3.2 Mikro Sertlik Ölçümleri.....	128
4.3.3 Çekme Testleri .....	134
4.3.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	138
4.4 DP1200-DP1200 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler .....	140
4.4.1 İy yapı İncelemeleri.....	140



4.4.2	Mikro Sertlik Ölçümleri.....	157
4.4.3	Çekme Testleri .....	163
4.4.4	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	168
4.5	Usibor1500-Usibor1500 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler .....	170
4.5.1	İçyapı İncelemeleri.....	170
4.5.2	Mikro Sertlik Ölçümleri.....	187
4.5.3	Çekme Testleri .....	195
4.5.4	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri.....	199
5.	TARTIŞMA ve SONUÇ .....	202
	KAYNAKLAR .....	211
	ÖZGEÇMİŞ .....	218



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

$E$	Enerji Seviyesi
$h$	Planck Sabiti
$\nu$	Frekans
$\lambda$	Dalga Boyu

### Kısaltmalar

### Açıklama

AHSS	Advanced High Strength Steel-AHSS
ANOVA	Anaysis of Variance- Varyans Analizi
ASTM	American Society for Testing and Materials-Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
B	Beynit
BM	Başlangıç Malzemesi
EB	Ergime Bölgesi
EBSD	Electron Backscatter Diffraction-Elektron Geri Saçınım Kırınımı
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis-Enerji dağılımı X-Işını Analzi
F	Ferrit
HSLA	Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelik
IPF	Ters Kutup Şekli
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
AK-ITAB	Alt Kritik Isı Tesiri Altındaki Bölge
DP	Dual Phase-(Çift Fazlı)
GOS	Tane Yönelim Yayılımı
İK-ITAB	İnter Kritik Isı Tesiri Altındaki Bölge
İT-ITAB	İnce Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge
KAM	Çekirdek İçi Ortalama Yönelim Farkı
KM	Kaynak Merkezi
KT-ITAB	Kaba Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge
Laser	Light Amplification Stimulated Emission Radiation-Uyarılmış Işıma ile Kuvetlendirilmiş Işık
M	Martenzit
Nd:YAG	Neodymium Doped Yttrium Aluminum Garnet-Neodyum Katkılı İtiryum Alüminyum Garnet
SEM	Scanning Electron Microscope -Taramalı Elektron Mikroskobu
SRI	Steel Recycling Institute- Çelik Geri Dönüşüm Enstitüsü
TM	Temperlenmiş Martenzit
TRIP	Transformation Induced Plasticity- Dönüşüm ile Plastisite
TWIP	TWinning Induced Plasticity- İkizlenme ile Plastisite
ÜK-ITAB	Üst Kritik Isı Tesiri Altındaki Bölge

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1.	2017 yılında ABD’de ekonomik sektöre göre toplam sera gazı salınımları .....6
Şekil 2.2.	Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik türlerinin çekme mukavemeti birim şekil değiştirme grafiği.....7
Şekil 2.3.	Sıradan bir araç için parça ağırlığı hafifletme ve malzeme üretim sırasında toplam CO <sub>2</sub> salınımı .....8
Şekil 2.4.	Toplam sera gazı salınımı .....8
Şekil 2.5.	Düşük alaşımlı CR380 çeliği ile kıyaslandığında farklı türdeki DP çeliklerinin potansiyel ağırlık azaltma oranları .....9
Şekil 2.6.	Çift fazlı çeliklerde işlem yolunun şematik gösterimi ve her bir aşamadaki ve termo-mekanik işlemin her bir aşamada beklenen dayanım arttırma mekanizması ..... 11
Şekil 2.7.	DP çeliklerinin yıllara göre araç başı kullanım miktarı ..... 13
Şekil 2.8.	Sıcak şekillendirme işlemleri ..... 15
Şekil 2.9.	Sıcak şekillendirme işlemleri ile mekanik özelliklerin değişimi ..... 16
Şekil 2.10.	Tipik bir lazer üretim cihazının şematik gösterimi ..... 18
Şekil 2.11.	a) Uyarım ile elektronun enerjisinin arttırılması b) Kendiliğinden yayınım c) Uyarılmış yayınım ..... 19
Şekil 2.12.	Diğer kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu ile karşılaştırıldığında lazer kaynağının yeri .....21
Şekil 2.13.	Lazer nüfuziyet kaynağı şematik gösterimi .....22
Şekil 2.14.	Nd:YAG lazer kaynağında ışının üretilmesi ve fiber optik kablo ile yönlendirilmesinin şematik gösterimi .....24
Şekil 2.15.	Farklı türdeki lazer modlarının şematik gösterimi .....25
Şekil 2.16.	Farklı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesinin şematik gösterimi a) CO <sub>2</sub> lazeri, b) Katı hal lazer üretici (Fiber, Nd:YAG) .....27
Şekil 2.17.	Dört farklı türde 4 kW güce sahip lazer için işletme maliyetlerinin karşılaştırılması .....28
Şekil 3.1.	Sisma SWA300 Nd:YAG lazer kaynak cihazı .....36
Şekil 3.2.	Nd:YAG lazer kaynak işlemleri sırasında numuneleri sabitlemek için kullanılan fikstür ..... 37
Şekil 3.3.	Çalışmada kullanılan KUKA robot kollu fiber lazer kaynak cihazı .....38
Şekil 3.4.	Fiber lazer kaynak işlemleri sırasında sabitlenmiş numune .....39
Şekil 3.5.	Kaynakla parçalardan mikro sertlik ölçümü alınan hat .....40
Şekil 3.6.	Kaynaklı plaka ve çekme numunesinin şematik gösterimi (ASTM-E8/E8M 2009).....41
Şekil 4.1.	Kaynak bölgesinin şematik gösterimi .....44
Şekil 4.2.	Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu (2,4 ms-44,8 joule/mm) ve b) 3 kodlu (2,8 ms-52,3 joule/mm) numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntüleri.....46
Şekil 4.3.	Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu (2,4 ms) ve b) 3 kodlu (2,8 ms) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M:Martenzit) .....46
Şekil 4.4.	Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu numune (2,4 ms) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune

	(2,8 ms) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numunelere ait ITAB mikro yapı görüntüleri.....	47
Şekil 4.5.	Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu (6,5kW-45,1 joule/mm) ve b) 5 kodlu (7,5 kW-52 joule/mm) numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntüleri.....	48
Şekil 4.6.	Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu (6,5kW) ve b) 5 kodlu (7,5kW) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	49
Şekil 4.7.	Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu numune (6,5kW) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 5 kodlu numune (7,5kW) ITAB makro yapı ve d) 5 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri.....	49
Şekil 4.8.	Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu (7,5 hz-45,5 joule/mm) ve b) 7 kodlu (8,5 hz-51,6 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri.....	51
Şekil 4.9.	Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu (7,5 hz) ve b) 7 kodlu (8,5 hz) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	51
Şekil 4.10.	Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu numune (7,5 hz) ITAB makro yapı, b) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 7 kodlu numune (8,5 hz) ITAB makro yapı ve d) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri.....	52
Şekil 4.11.	Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu (1 mm-48,5 joule/mm) ve b) 9 kodlu (1,2 mm-48,5 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri.....	53
Şekil 4.12.	Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu (1 mm) ve b) 9 kodlu (1,2 mm) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	54
Şekil 4.13.	Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu numune (1 mm) ITAB makro yapı, b) 8 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (1,2 mm) ITAB makro yapı ve b) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri.....	54
Şekil 4.14.	Isı girdisinin en düşük olduğu 1 kodlu numunede (44,8 joule/mm) a) EB, b) ITAB genel, c) İK-ITAB d) AK-ITAB ve e) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, B: Beynit ve F: Ferrit).....	57
Şekil 4.15.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numunede (52,3 joule/mm) a) EB, b) ITAB genel, c) İK-ITAB ve d) AK-ITAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, B: Beynit ve F: Ferrit).....	58
Şekil 4.16.	Isı girdisinin en düşük olduğu 1 kodlu numuneye (44,8 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF-ND haritası ve d) Faz haritası.....	60
Şekil 4.17.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numuneye (52,3 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	61
Şekil 4.18.	1 kodlu (44,8 joule/mm) ve 3 kodlu (52,3 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı.....	63
Şekil 4.19.	1 kodlu numune (Darbe süresi: 2,4 ms-44,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi.....	65
Şekil 4.20.	3 kodlu numune (Darbe süresi: 2,8 ms-52,3 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi.....	65

Şekil 4.21.	1 kodlu numune (Darbe gücü:6,5 kW-45,1 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	67
Şekil 4.22.	5 kodlu numune (Darbe gücü:7,5 kW-52 joule/mm) kaynak bölgesi sertlik değişimi.....	67
Şekil 4.23.	6 kodlu numune (Frekans: 7,5 Hz-45,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	69
Şekil 4.24.	7 kodlu numune (Frekans: 8,5 Hz-51,6 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	69
Şekil 4.25.	8 kodlu numune (Işın çapı: 1 mm-45,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	71
Şekil 4.26.	9 kodlu numune (Işın çapı: 1,2 mm-45,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	71
Şekil 4.27.	Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi.....	72
Şekil 4.28.	Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değerlerinin değişimi .....	74
Şekil 4.29.	Çekme mukavemetinin darbe süresi ile değişimi .....	77
Şekil 4.30.	Yüzde uzamanın darbe süresi ile değişimi .....	77
Şekil 4.31.	Çekme mukavemetinin darbe gücü ile değişimi.....	78
Şekil 4.32.	Yüzde uzamanın darbe gücü ile değişimi .....	78
Şekil 4.33.	Çekme mukavemetinin frekans ile değişimi.....	79
Şekil 4.34.	Yüzde uzamanın frekans ile değişimi .....	80
Şekil 4.35.	Çekme mukavemetinin ışın çapı ile değişimi .....	81
Şekil 4.36.	Yüzde uzamanın ışın çapı ile değişimi .....	81
Şekil 4.37.	Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler.....	83
Şekil 4.38.	DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı a) 1 kodlu numune (44,8 joule/mm) b) 3 kodlu numuneye (52,3 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri .....	85
Şekil 4.39.	a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn-55 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (2750 W, 100 mm/sn-27,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	88
Şekil 4.40.	a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (2750 W, 100 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	88
Şekil 4.41.	a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (2750 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	89
Şekil 4.42.	a) 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn-45 joule/mm) ve b) 6 kodlu numuneye (2250 W, 100 mm/sn-22,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	90
Şekil 4.43.	a) 4 kodlu (2250 W, 50 mm/sn) ve b) 6 kodlu (2250 W, 100 mm/sn) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit) .....	90
Şekil 4.44.	a) 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (2250 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	91
Şekil 4.45.	a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn-35 joule/mm) ve b) 9 kodlu numuneye (1750 W, 100 mm/sn-17,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	92

Şekil 4.46.	a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn) ve b) 9 kodlu numuneye (1750 W, 100 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	92
Şekil 4.47.	a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (1750 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	93
Şekil 4.48.	Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, AK-ITAB ve e) BM SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit).....	95
Şekil 4.49.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit).....	96
Şekil 4.50.	Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	98
Şekil 4.51.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	99
Şekil 4.52.	1 kodlu (55 joule/mm) ve 9 kodlu (17,5 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı .....	100
Şekil 4.53.	1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn-55 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	102
Şekil 4.54.	3 kodlu numune (2750 W, 100 mm/sn-27,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	102
Şekil 4.55.	4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn-45 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	104
Şekil 4.56.	6 kodlu numune (2250 W, 100 mm/sn-22,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	104
Şekil 4.57.	7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn-35 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	105
Şekil 4.58.	9 kodlu numune (1750 W, 100 mm/sn-17,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	106
Şekil 4.59.	Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi.....	107
Şekil 4.60.	Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi .....	108
Şekil 4.61.	1750 W, 2250 W ve 2750 W güç değerlerinde çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi.....	111
Şekil 4.62.	1750 W, 2250 W ve 2750 W güç değerlerinde yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi.....	111
Şekil 4.63.	Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler.....	113
Şekil 4.64.	DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı a) 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve .....	114
	b) 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	114
Şekil 4.65.	a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn-88 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (2200 W, 75 mm/sn-29,3 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	116

Şekil 4.66.	a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (2200 W, 75 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	117
Şekil 4.67.	a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (2200 W, 75 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	117
Şekil 4.68.	a) 4 kodlu (3000 W, 25 mm/sn-120 joule/mm) ve b) 6 kodlu (3000 W, 75 mm/sn-40 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri.....	118
Şekil 4.69.	a) 4 kodlu (3000 W, 25 mm/sn) ve b) 6 kodlu numunelere (3000 W, 75 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	119
Şekil 4.70.	a) 4 kodlu numune (3000 W, 25 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (3000 W, 75 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	119
Şekil 4.71.	Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (29,3 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit).....	122
Şekil 4.72.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit).....	123
Şekil 4.73.	Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (29,3 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	125
Şekil 4.74.	Isı girdisinin en düşük olduğu 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	126
Şekil 4.75.	3 kodlu (29,3 joule/mm) ve 4 kodlu (120 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı .....	127
Şekil 4.76.	1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn-88 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	129
Şekil 4.77.	3 kodlu numune (2200 W, 75 mm/sn-29,3 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	129
Şekil 4.78.	4 kodlu numune (3000 W, 25 mm/sn-120 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	131
Şekil 4.79.	6 kodlu numune (3000 W, 75 mm/sn-40 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	131
Şekil 4.80.	Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi.....	132
Şekil 4.81.	Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi .....	133
Şekil 4.82.	2200W ve 3000W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi.....	135
Şekil 4.83.	2200W ve 3000W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi.....	136
Şekil 4.84.	Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler.....	138
Şekil 4.85.	DP1000-DP1000 fiber lazer ile kaynaklı a) 3 kodlu numune (29,3 joule/mm) ve b) 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri .....	139

Şekil 4.86.	a) 1 kodlu numune (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) , b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	142
Şekil 4.87.	a) 1 kodlu numune (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) ait EB mikro yapı görüntüleri .....	143
Şekil 4.88.	1 kodlu numuneye (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı, b) KT-ITAB mikro yapı ve c) İT-ITAB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	144
Şekil 4.89.	3 kodlu numuneye (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı, b) KT-ITAB, İT-ITAB ve İK-ITAB mikro yapı, c) İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB mikro yapı görüntüleri (F: Ferrit, M: Martenzit ve TM: Temperlenmiş Martenzit).....	145
Şekil 4.90.	5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21joule/mm) ait a) ITAB makro yapı ve b) ITAB mikro yapı görüntüleri (F: Ferrit, M: Martenzit ve TM: Temperlenmiş Martenzit).....	145
Şekil 4.91.	a) 6 kodlu numune (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	147
Şekil 4.92.	a) 6 kodlu numune (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	148
Şekil 4.93.	6 kodlu numuneye (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı ve b) ITAB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit).....	149
Şekil 4.94.	9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı b) KT-ITAB ve İT-ITAB mikro yapı c) KT-ITAB, İT-ITAB ve AK-ITAB mikro yapı görüntüleri.....	149
Şekil 4.95.	Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit).....	151
Şekil 4.96.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit).....	152
Şekil 4.97.	Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası .....	154
Şekil 4.98.	Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	155
Şekil 4.99.	1 kodlu (120 joule/mm) ve 5 kodlu (21 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı .....	156
Şekil 4.100.	1 kodlu numunede (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	158
Şekil 4.101.	3 kodlu numunede (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	158
Şekil 4.102.	5 kodlu numunede (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	159



Şekil 4.103.	6 kodlu numunede (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	160
Şekil 4.104.	9 kodlu numunede (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	160
Şekil 4.105.	Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi.....	161
Şekil 4.106.	Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değişimi.....	162
Şekil 4.107.	2100 W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi.....	164
Şekil 4.108.	2100 W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi....	165
Şekil 4.109.	60 mm/sn ilerleme hızı için çekme mukavemetinin lazer gücü ile değişimi.....	166
Şekil 4.110.	60 mm/sn ilerleme hızı için yüzde uzamanın lazer gücü ile değişimi ....	166
Şekil 4.111.	Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler.....	168
Şekil 4.112.	DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı a) 5 kodlu numune (21 joule/mm) ve b) 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri .....	169
Şekil 4.113.	a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn-37,5 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (1500 W, 120 mm/sn-12-5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri .....	171
Şekil 4.114.	a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (1500 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri.....	171
Şekil 4.115.	a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (1500 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	172
Şekil 4.116.	a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn-50 joule/mm) ve b) 6 kodlu numuneye (2000 W, 120 mm/sn-16,7 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	173
Şekil 4.117.	a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn) ve b) 6 kodlu numuneye (2000 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri.....	173
Şekil 4.118.	a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (2000 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	174
Şekil 4.119.	a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn-62,5 joule/mm) ve b) 9 kodlu numuneye (2500 W, 120 mm/sn-20,8 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri.....	175
Şekil 4.120.	a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn) ve b) 9 kodlu numuneye (2500 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri.....	175
Şekil 4.121.	a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (2500 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri .....	176
Şekil 4.122.	Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (12,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit) .....	178

Şekil 4.123. Isı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit, B: Beynit) .....	179
Şekil 4.124. 3 kodlu numunenin (12,5 joule/mm) EB'sine ait a) EDX tarama bölgesi b) EDX analiz sonucu .....	181
Şekil 4.125. 7 kodlu numunenin (62,5 joule/mm) EB'sine ait a) EDX tarama bölgesi b) EDX analiz sonucu .....	182
Şekil 4.126. Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	184
Şekil 4.127. Isı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası.....	185
Şekil 4.128. 3 kodlu (17,5 joule/mm) ve 7 kodlu (62,5 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı .....	186
Şekil 4.129. 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn-37,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	188
Şekil 4.130. 3 kodlu numune (1500 W, 120 mm/sn-12,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	188
Şekil 4.131. 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn-50 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	190
Şekil 4.132. 6 kodlu numune (2000 W, 120 mm/sn-16,7 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	190
Şekil 4.133. 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn-62,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	192
Şekil 4.134. 9 kodlu numune (2500 W, 120 mm/sn-20,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	192
Şekil 4.135. Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi.....	193
Şekil 4.136. Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi .....	194
Şekil 4.137. 1500W, 2000W ve 2500W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi.....	197
Şekil 4.138. 1500W, 2000W ve 2500W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi.....	197
Şekil 4.139. Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler.....	199
Şekil 4.140. Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı a) 3 kodlu numune (12,5 joule/mm) ve b) 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	201

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1.	Deneylerde kullanılan DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 malzemelerinin kimyasal kompozisyonları (%ağırlık) .....	32
Çizelge 3.2.	Deneylerde kullanılan DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 malzemelerinin mekanik özellikleri .....	32
Çizelge 3.3.	DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynak parametreleri .....	33
Çizelge 3.4.	DP800-DP800 fiber lazer kaynak parametreleri .....	34
Çizelge 3.5.	DP1000-DP1000 fiber lazer kaynak parametreleri .....	34
Çizelge 3.6.	DP1200-DP1200 fiber lazer kaynak parametreleri .....	35
Çizelge 3.7.	Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynak parametreleri.....	35
Çizelge 3.8.	Deneylerde kullanılan Sisma SWA 300 Nd:YAG lazer kaynak cihazının teknik özellikleri .....	37
Çizelge 4.1.	Farklı parametrelerle üretilen DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları .....	75
Çizelge 4.2.	Farklı parametrelerle üretilen Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerde darbe enerjisi (joule), ortalama güç (W) ve ısı girdisi (joule/mm) değerleri.....	76
Çizelge 4.3.	Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	82
Çizelge 4.4.	Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	82
Çizelge 4.5.	Farklı parametrelerle üretilen DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları .....	109
Çizelge 4.6.	Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	112
Çizelge 4.7.	Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	112
Çizelge 4.8.	Farklı parametrelerle üretilen DP1000-DP1000 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları .....	134
Çizelge 4.9.	Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	137
Çizelge 4.10.	Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	137
Çizelge 4.11.	Farklı parametrelerle üretilen DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları .....	163
Çizelge 4.12.	Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	167
Çizelge 4.13.	Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	167
Çizelge 4.15.	Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	198
Çizelge 4.16.	Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu .....	198

## 1. GİRİŞ

Sürdürülebilirliğin sağlanmasına yönelik, artan enerji ihtiyacı ve yakıt tüketiminden kaynaklanan sera gazı salınımının sebep olduğu çevre kirliliği konularında uluslararası kuruluşlar tarafından çeşitli kısıtlamalar getirilmiş ve her geçen yıl bu kısıtlamalar artarak devam etmektedir. Bu yüzden, yüksek rekabetin olduğu otomotiv endüstrisinde, enerji ve çevre ile ilgili endişeler otomotiv üreticilerini sürekli olarak yakıt tüketimini ve CO<sub>2</sub> salınımını azaltmak için yöntemler aramaya teşvik etmektedir. Otomotiv endüstrisi araç ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini azaltacak ve aynı zamanda CO<sub>2</sub> salınımını azaltacak çalışmalara her zamankinden daha fazla ağırlık verilmiş durumdadır. Bu bağlamda, taşıt üzerindeki parçaların daha hafif malzemelerden üretilmesi, taşıtın boyutunun küçültülmesi, parçaların optimizasyon teknikleri ile yeniden tasarlanıp yeni üretim teknikleri ile üretilmesi gibi farklı metotlar kullanılarak hafifletme sağlanabilmektedir.

Araç hafifletme yöntemlerinin başında düşük yoğunluklu malzemelerin kullanımı gelmektedir. Alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, titanyum alaşımları, yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin yeni nesil araçlarda kullanımı her geçen gün artmaktadır. Otomobillerde kullanılan metal malzemelerin ortalama %50'sini çelik saclar oluşturmaktadır. Yani, çelik saclarla ilgili yapılacak en küçük bir iyileştirmenin bile etkisi büyük olacaktır. Örneğin, ultra yüksek mukavemetli çelikleri otomotiv gövde parçalarında kullanmak ağırlık azaltma ve bunu yaparken çarpışma performansından ve yolcu güvenliğinden ödün vermemek için etkili bir yöntemdir. Ayrıca ultra yüksek mukavemetli çelikleri kullanmak maliyet açısından alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve titanyum alaşımlarına göre halen avantajlıdır. Bu nedenle özellikle ultra yüksek mukavemetli çelikler otomobillerde ve diğer araçlarda giderek daha yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Bu sebeple araç üreticileri araç ağırlığını azaltmaya yönelik ultra yüksek mukavemetli çelik sacları, özellikle güvenliğin ön planda olduğu parçalarda tercih etmeye başlamışlardır.

Otomobil gövde tasarımcıları her bir gövde yapısal parçası için belirli deformasyon oranlarına sahip malzeme seçimini uygun şekilde yapmak zorundadır. Örneğin, araç ön deformasyon bölgelerinde daha uzun bir mesafede mümkün olabildiği kadar çok darbe

enerjisini emebilen malzemeler kullanılmalıdır. Öte yandan, araç gövdesinin orta kısımlarında kısa bir mesafede darbe enerjisini emebilen (minimum deformasyon) güçlü malzemeler kullanılmalıdır. Bu yüzden her bir farklı parçada alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları, kompozit malzemeler, yüksek mukavemetli çelikler ve ultra yüksek mukavemetli çelikler gibi çeşitli ve geniş bir yelpazede malzemelerin seçimi önemlidir. Günümüzde üretilen arabalarda çelik parçalar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle farklı parçalarda ihtiyaca göre farklı mukavemet ve uzama özelliklerine sahip yüksek ve ultra yüksek mukavemete sahip çeliklerin seçimi ve bu çeliklerin kaynaklı birleştirilmeleri hayati önem taşımaktadır.

Bilindiği gibi otomotiv parçalarının üretimi sırasında kaynak ile birleştirme kaçınılmaz bir üretim yöntemidir. Özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisi ve sac birleştirme işleminde öne çıkan ve üretim hızını önemli ölçüde arttıran lazer kaynağının endüstriyel imalattaki önemi giderek artmaktadır. Günümüzde lazer kaynağı otomotiv endüstrisinde çeşitli kalınlıklarda ve tiplerde çok çeşitli malzemelerin birleştirilmesinde hızlı ve hassas birleştirmeye olanak sağlayan bir teknolojidir. Lazer kaynağı hassas birleştirme, yüksek derinlik genişlik oranına sahip dar kaynak dikişi, çok dar bir ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), düşük ısı girdisi, derin nüfuziyet, çok kısa sürede kaynak işlemi (yüksek kaynak hızı), yüksek verimlilik, düşük kalıntı gerilme ve çarpılma, estetik açıdan güzel görünüm ve ilave bir işlem gerektirmeme (taşlama gerektirmez) gibi özel olanaklar sağlamaktadır. Ultra yüksek mukavemetli çelikler gibi çeliklerin ince sac gruplarında lazer kaynağının otomobil yapısal parçalarında kullanılması (Tailor welded blank (TWB) yapısal parçaları) birçok avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bu çeliklerin işlem sonrası mekanik özelliklerinin belirlenmesinde lazer kaynağı önemli bir rol oynar. Bu nedenle ultra yüksek mukavemetli çeliklerin kaynağında metalürjik ve mekanik olayları anlamak önemlidir.

Son zamanlarda, ultra yüksek mukavemetli çeliklerde lazer kaynak işleminin hassasiyetini anlamak için birçok çaba gösterilmiştir. Kabul edilebilir bir kaynak profili ve tatmin edici mekanik özellikler elde edebilmek için kaynak dikişi şeklinin kontrol edilmesi esastır. Kaynak metali katılma davranışını etkileyen kaynak dikiş şekli, kaynak parametrelerinden ve iş parçasına karşılık gelen ısı girişi miktarından etkilenir. Bu nedenle, kaynak parametrelerinin kaynak morfolojisi üzerindeki etkisinin ve kaynak

kusurlarının nedenlerini belirlemek gereklidir. Ardından, gerekli kaynak kalitesini ve özelliklerini sağlayan ve ayrıca kaynak hatalarını en aza indiren kaynak parametrelerinin optimum kombinasyonunu belirlemek mümkün olacaktır. Bu sebeple yapılan çalışmada ticari olarak temin edilen ultra yüksek mukavemetli DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 çelik sacların lazer kaynağında kaynak parametrelerine bağlı olarak mikro yapı, mekanik özellikler ve kırılma özellikleri (fraktografi) arasındaki ilişkilerin ortaya konulup otomotiv sektöründeki uygulamada kullanılabilirlik lazer kaynak parametre aralığının (veya parametrelerinin) belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede geleneksel kaynak yöntemlerinde bazı problemlere (ITAB'da nispeten geniş bir alanda keskin mukavemet düşüşü) sahip ultra yüksek mukavemetli çelik sacların ülkemiz otomotiv endüstrisine adaptasyonu da kolaylaştırabilecektir.

Günümüzde kullanılan tüm kaynak yöntemlerinde, uygulanan kaynak yöntemine bağlı olarak kaynak bölgesi ve çevresinde istenmeyen mukavemet düşüşleri meydana gelmektedir. Kaynak kalitesinin istenen seviyede olması ancak uygun kaynak parametrelerinin seçimiyle mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ultra yüksek mukavemetli DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor 1500 çelikleri lazer kaynağı ile alın şeklinde birleştirilmiştir. Çalışmada iki farklı katı hal lazer kaynağı kullanılmıştır. Darbeli Nd:YAG (Neodymium doped yttrium aluminum garnet (Y3Al5O12) kristali ile oluşturulan lazer) lazer kaynak cihazı ile DP 800 çeliği kaynak edilmiştir. Nd:YAG lazer kaynak işlemlerinde en etkili kaynak parametreleri darbe süresi, darbe gücü, frekans, ışın çapı ve ilerleme hızıdır. Fiber lazer kaynak cihazı ile ise DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor 1500 çelikleri birleştirilmiştir. Fiber lazer kaynak işlemlerinde ise en etkili kaynak parametreleri olarak lazer gücü, ilerleme hızı ve odak mesafesi söylenebilir. Çalışmada değişen kaynak parametrelerinin bağlantının mekanik ve mikro yapı özelliklerine olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın kaynak araştırması bölümünde taşıt ağırlığı hafifletme stratejilerine değinilmiş ve yüksek-ultra yüksek mukavemetli çeliklerin taşıt ağırlığı hafifletmedeki rolü üzerinde durulmuştur. Özellikle çalışmada kullanılan farklı mukavemet değerlerindeki çift fazlı çeliklerin ve Usibor 1500 çeliğinin otomotiv endüstrisi için önemi

üzerinde durulmuştur. Otomotiv sanayinde kaynaklı birleştirmenin önemi vurgulanmış ve çalışmada tercih edilen kaynak yöntemi olan lazer kaynağından yola çıkarak lazer teknolojisinin temel prensipleri açıklanmıştır. Lazer kaynağının prensipleri detaylandırılmış ve çalışmada kullanılan darbeli Nd:YAG lazer kaynağı ve fiber lazer kaynağının temel bileşenleri ve endüstriyel önemi vurgulanmıştır. Lazer alın kaynağı üzerine yapılan çalışmalar incelenerek özetlenmiştir.

Materyal ve yöntem kısmında çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerine yer verilmiş ve faydalanılan deneysel detaylar açıklanmıştır. Deneysel parametreleri ve çalışmada kullanılan kaynak cihazlarının özellikleri gösterilmiştir. Mekanik ve mikro yapı özelliklerin incelenmesi aşamasında kullanılan cihazlar, özellikleri ve uygulanan yöntemlere detaylı bir şekilde bu bölümde yer verilmiştir.

Bulgular kısmında deneylerden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Lazer kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme testi ve sertlik deneylerinden faydalanılmıştır. Çekme testi sonucu kırılan numunelerin kırılma yüzeyi incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy-SEM) kullanılarak yapılmıştır. Kaynak parametrelerinin kaynak kesiti üzerine olan etkileri optik mikroskop, SEM ve geri yansıyan elektron difraksiyon analizi (Electron Backscatter Diffraction-EBSD) teknikleri kullanılarak incelenmiştir.

Çalışmanın tartışma ve sonuç kısmında çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenerek verilmektedir. Ayrıca sonuçlar üzerine değerlendirmeler ve öneriler de bu kısımda yer almaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

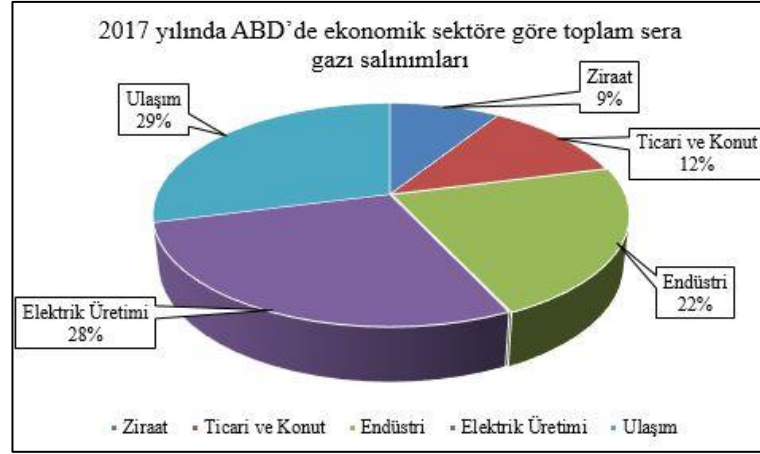
Bu bölümde ilk olarak tezin yapılmasına dayanak olan otomotiv endüstrisinde taşıt hafifletme stratejisine değinilmiştir. Buradan yola çıkılarak çalışmada kullanılması için seçilen çift fazlı DP çelikleri ve sıcak şekillendirilebilir Usibor1500 çeliği detaylarıyla açıklanmıştır. Otomotiv sektöründe kullanılan bu çelik parçalara muhakkak ki birleştirme ve dolayısı ile kaynak işlemi uygulanacaktır. Günümüz modern teknolojisinde geleneksel kaynak yöntemlerinin yerini gelişmiş lazer teknolojisi kullanarak gerçekleştirilen lazer kaynağı almaya başlamıştır. Tezin bu kısmında lazer teknolojisi ve çalışmada kullanılan katı hal lazer kaynak türlerinden olan ve endüstride kendine yoğun bir şekilde yer bulan Nd:YAG ve fiber lazer kaynak yöntemleri detayları ile açıklanmış ve daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Son olarak çalışmada kullanılan kaynak yapılacak parçaların konumlandırılmalarına göre adlandırılan alın kaynağı şeklinde birleştirme ve lazer alın kaynaklı birleştirmeler üzerine literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

### 2.1 Taşıt Hafifletme Stratejisi

Otomotiv endüstrisinin güncel durumu küresel çevresel etkilere özellikle sera gazı salınımına önemli derecede sebep olmakta ve bu durum çevreye duyarlı modern toplumlar için kabul edilemez bir hal almıştır. Örneğin, Birleşik Krallık'ta ulaşım şu anda ülkedeki toplam doğrudan sera gazı salınımının yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır. Ayrıca kişisel otomobiller en fazla sera gazı salınımına neden olan araçlardır (Raugei ve ark. 2015).

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi 2017 yılında ABD'de ulaşım sektörü %29'lük oran ile sera gazı salınımında sektörel bazlı en yüksek orana sahiptir. Yakıt tüketimi ve sera gazı salınımının artmasıyla birlikte çevre güvenliği sosyal bir problem haline gelmiştir. Bu nedenle otomotiv endüstrisi araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini arttırmak için sürekli olarak mücadele etmektedir (Jia ve ark. 2016). Bir aracın toplam ağırlığından %10 azaltmanın yakıt ekonomisine %7 oranında katkı sağladığı ve sera gazı salınımını da %5 oranında azalttığı tahmin edilmektedir (Singh 2016).



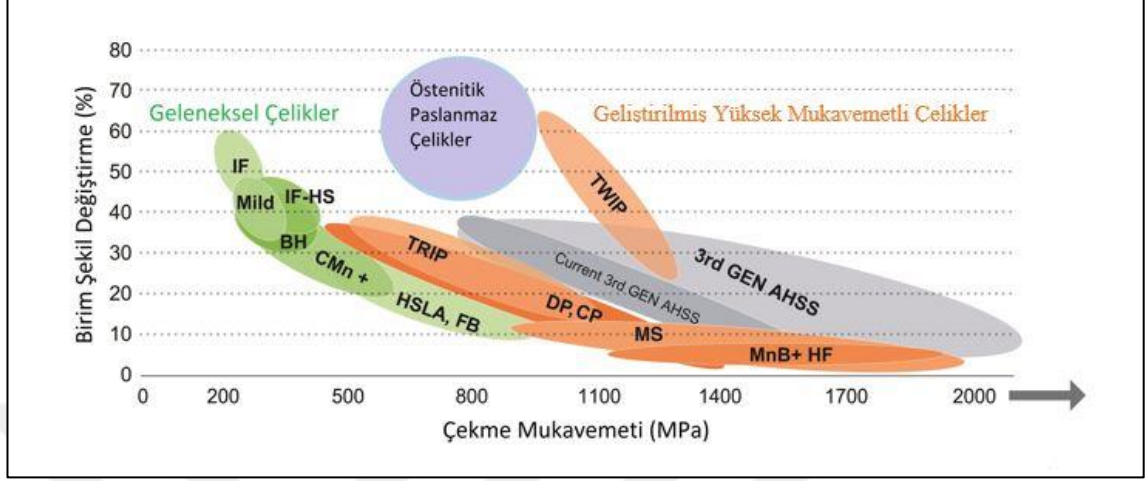


**Şekil 2.1.** 2017 yılında ABD’de ekonomik sektöre göre toplam sera gazı salınımları (Anonim 2017)

Bilindiği üzere araç toplam ağırlığının %25’ini araç gövdesi oluşturmaktadır. Otomobil gövde ağırlığının azaltılması araçların yakıt tasarrufunun yönetmeliklere uygun şekilde geliştirilmesinde kilit rol oynamaktadır. Ultra yüksek mukavemetli çeliklerin araç gövde parçalarında kullanılması araç hafifletmenin yanında otomobil güvenliğini de sağlamanın en ekonomik ve etkili yoludur (Chen ve ark. 2017, Duan ve ark. 2017).

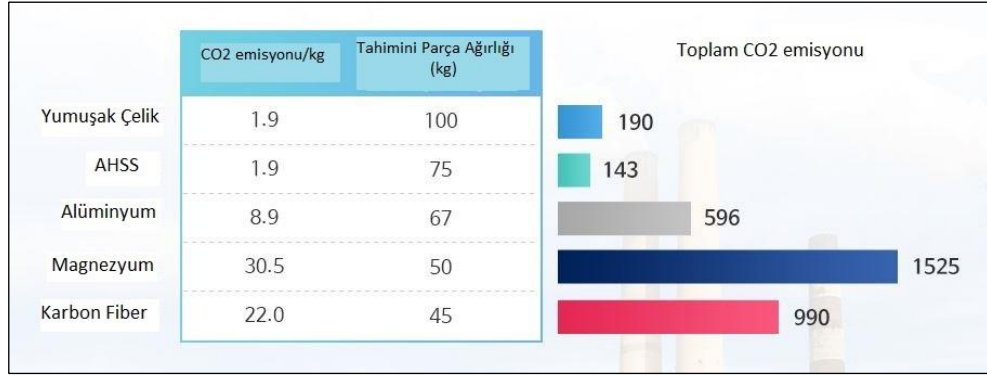
Otomotiv endüstrisinde şasi ve gövde bileşenlerinde geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (Advanced High Strength Steel-AHSS) kullanımı son 20 yılda artan güvenlik ve yakıt tüketimi gereksinimlerini karşılayabilmek için katlanarak artmıştır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler mükemmel mukavemet ve süneklik kombinasyonunun sağladığı düşük araç gövde sac kalınlığı sayesinde ağırlık azaltmanın yanında otomobil gövdesinin çarpışma dayanımını ve yolcu güvenliğini arttırmak için de geliştirilmiştir. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler; çift fazlı DP çelikleri (Dual Phase), TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri, kompleks fazlı çelikler, martenzitik çelikler (Martensitic Steel (MS)) ve TWIP (Twinning Induced Plasticity) çelikleri gibi mikro yapı ve işlem geçmişine göre isimlendirilen çeşitli çelik türlerini içermektedir (Şekil 2.2)(Anonim2019b). Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin çeliklerin akma dayanımları 550 MPa ve çekme dayanımları 700 MPa’ın üzerindedir. Özellikle çift fazlı DP çelikleri iyi işlenebilirlik ve optimum mukavemet süneklik kombinasyonu sayesinde diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklere göre otomotiv endüstrisinde ön plana çıkmaktadır (Cui ve ark. 2016, Li ve ark.

2013, Nayak ve ark. 2015, Frómata ve ark. 2018, Liu ve ark. 2015, Bandyopadhyay ve ark. 2016).



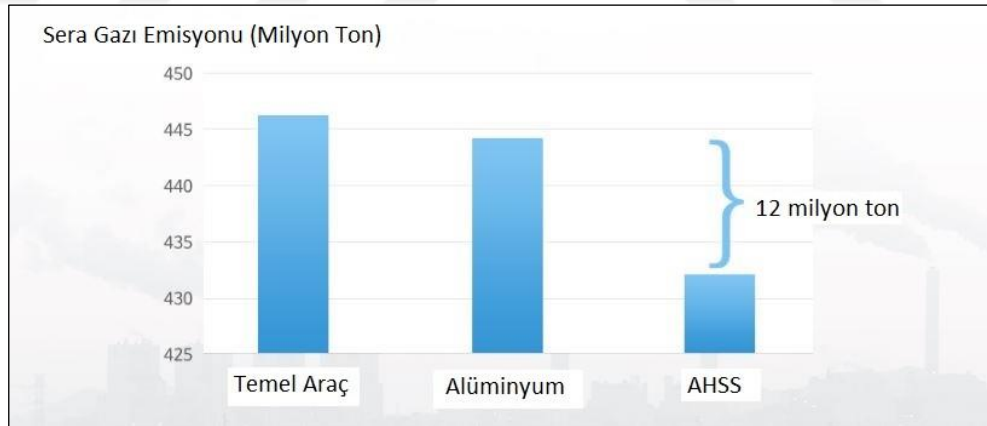
**Şekil 2.2.** Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik türlerinin çekme mukavemeti birim şekil değiştirme grafiği (Anonim 2019b)

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsünün (American Iron and Steel Institute (AISI)) bir birimi olan Çelik Geri Dönüşüm Enstitüsü (The Steel Recycling Institute (SRI)), bir aracın yaşam boyu çevresel etkisine yönelik malzeme üretim salınımlarının önemini gösteren hakemli bir çalışma yayınlamıştır. Çalışma “Otomotiv Hafifletmede Sera Gazı ve Enerji Yaşam Döngüsü” AHSS ile alüminyumların karşılaştırılması ve çevresel etkilerini incelemektedir. Ayrıca sera gazı salınımlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesinin uygulanmasının önemini göstermektedir. Şekil 2.3’teki beş gövde yapısal malzemesi, sera gazı salınımlarına karşı ağırlık hafifletme potansiyellerini belirlemek için karşılaştırıldı. Grafikte görüldüğü gibi alüminyum her ne kadar araç hafifletmede geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğin önüne geçse de toplam malzeme üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımları kıyaslandığında geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik çok daha avantajlı görünmektedir.



**Şekil 2.3.** Sıradan bir araç için parça ağırlığı hafifletme ve malzeme üretim sırasında toplam CO<sub>2</sub> salınımı (Anonim 2019e)

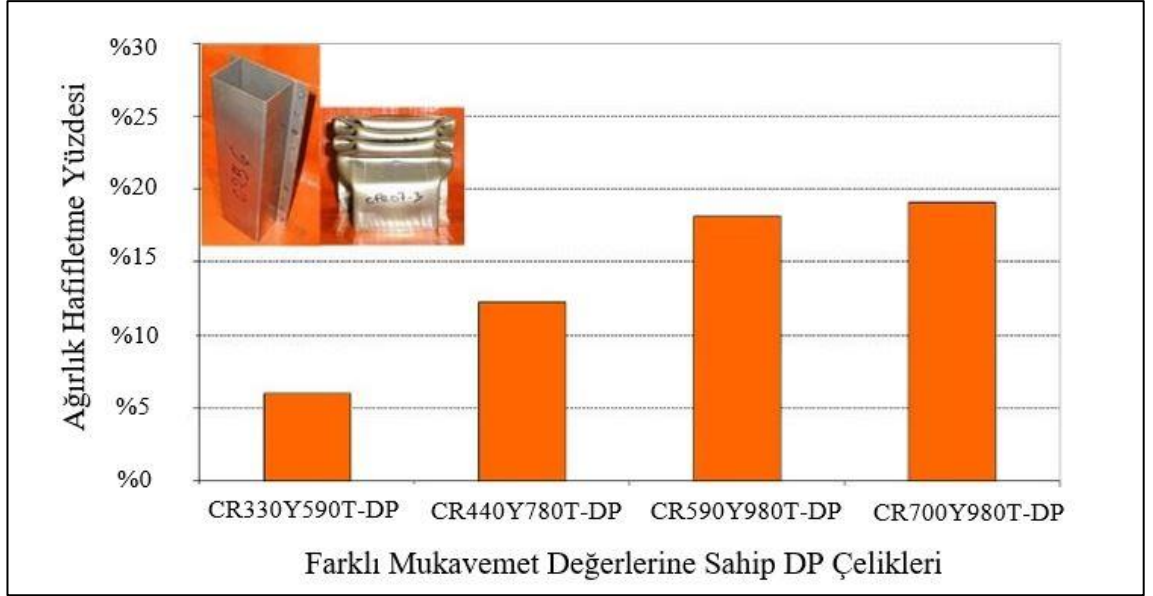
Çalışmada 2016 model araçlardan oluşan beş araç filosunun temel tipte, alüminyum ağırlıklı ve geliştirilmiş yüksek mukavemetli malzemelerden üretilmiş araçlarının yaşam döngüsü boyunca ürettikleri sera gazları kıyaslanmıştır (Şekil 2.4). Geliştirilmiş yüksek mukavemetli malzeme ağırlıklı araçlardan oluşan filo alüminyum ağırlıklı filoya göre 12 milyon ton daha az sera gazı üretecek sonucu çıkmıştır. Bu 1,2 milyar galon benzin tüketerek salınan sera gazı ile eşdeğerdir.



**Şekil 2.4.** Toplam sera gazı salınımı (Anonim 2019e)

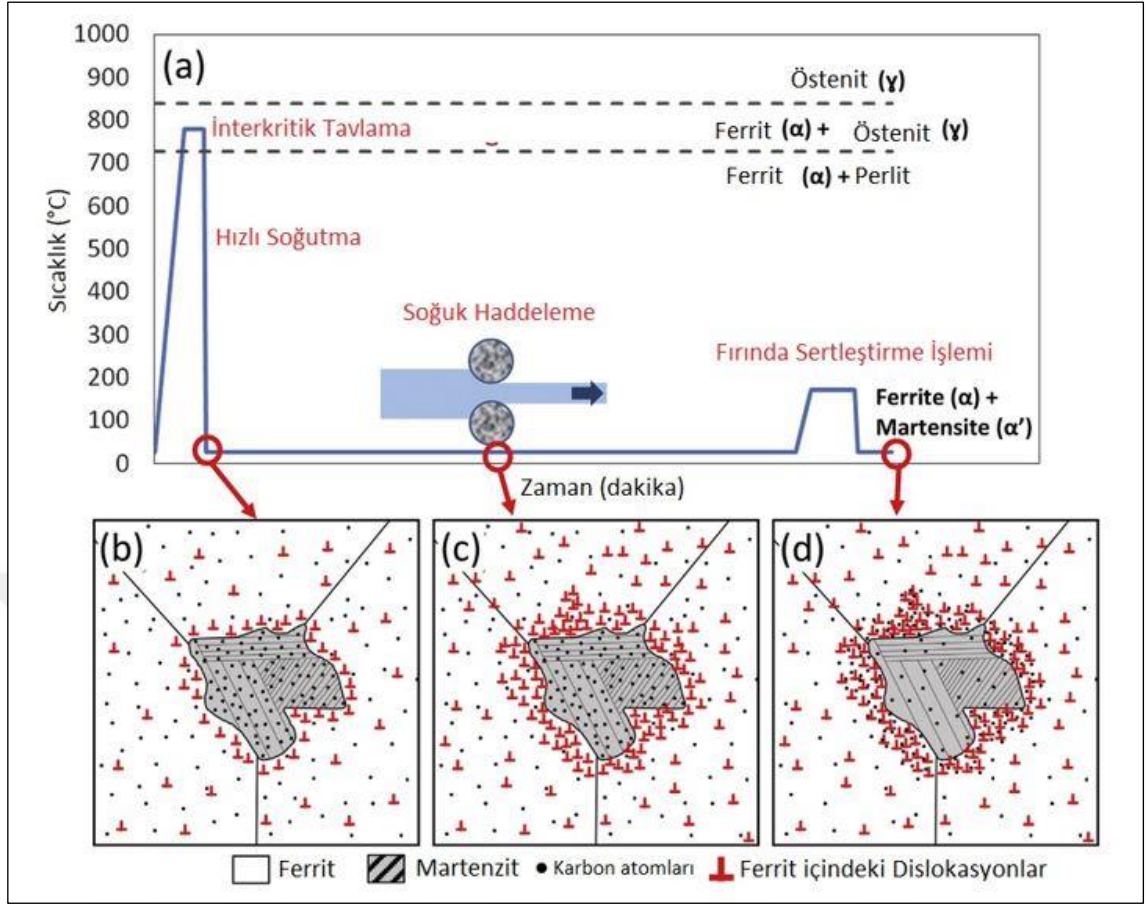
## 2.2 Çift Fazlı Çelikler

Yakıt tüketimini ve sera gazı salınımlarını azaltma ihtiyacı araç üreticilerini hafif metalleri daha sünek ve daha dayanıklı olacak şekilde kullanma konusunda motive etmektedir (Xue ve ark. 2017). Otomotiv uygulamalarında kullanılan malzemeler kolay biçimlendirilebilir, kaynak edilebilir, kaplanabilir ve tamir edilebilir olmalıdır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler özellikle de çift fazlı DP (Dual Phase) çelikleri araç ağırlığını hafifletmek ve CO<sub>2</sub> salınımı azaltmak için benzersiz özellikleri ile otomotiv endüstrisinde kendine has çözümler üretmektedir. Çift fazlı çelikler araç ağırlığını hafifletirken aynı zamanda güvenlik, performans, geri dönüşüm ve maliyet özelliklerinden de ödün vermemektedir. Düşük mukavemetli ve düşük alaşımlı bir çelikle (CR380) kıyaslandığında geliştirilmiş yüksek mukavemetli sınıfına giren farklı mukavemet değerlerindeki DP çeliklerinin potansiyel ağırlık azaltma kabiliyetleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Aydın 2015, Chabok ve ark. 2017).



**Şekil 2.5.** Düşük alaşımlı CR380 çeliği ile kıyaslandığında farklı türdeki DP çeliklerinin potansiyel ağırlık azaltma oranları (Anonim 2019b)

Çift fazlı çelikler inter kritik tavlama (malzemenin ostenit-ferrit bölgesine kadar ısıtıldığı ve belli bir süre tutulduğu tavlama) ve sonrasında hızlı soğutma sonucu ferrit fazından oluşan yumuşak matrisin içine dağıtılmış sert martenzit fazından oluşmaktadır. Ostenit-martenzit dönüşümü, hacim genişlemesi eşliğinde, mobil dislokasyonların ferrit matris çevresine girmesine neden olur. Bu dislokasyonların hareketliliği, DP çeliğindeki yüksek ilk pekleşme sertleşme oranı ve sürekli deformasyona neden olur. Bu adımı genellikle istenen mekanik özelliklerin birleşimini elde etmek için soğuk haddeleme ve fırında sertleştirme adı verilen ısı işlemler izler. Bu genel termo-mekanik işlemde yer alan ana mekanizmalar Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Çift fazlı çeliklerde ince taneli martenzit %30-70 küresel ferrit matris içine dağılmakta ve %1-10 kalıntı ostenit içermektedir. Çift fazlı çelikler eşsiz kompozit mikro yapısı sayesinde yüksek mukavemet, yüksek pekleşme sertleşmesi, düşük akma mukavemeti, yüksek homojen ve toplam uzama, yüksek tokluk ve mükemmel şekillendirilebilirliğe sahiptir. Bu çeliklerin yüksek pekleşme sertleştirme davranışı, otomotiv bileşenlerinin daha iyi şekillendirilebilirliği ve çarpışma performansı ile ilişkilidir (Di ve ark. 2017, Farabi ve ark. 2011, Slovaca 2015, Wang ve ark. 2017, Khosravani ve ark. 2017, P. Svec ve A. Schrek 2016, Xia ve ark. 2008).



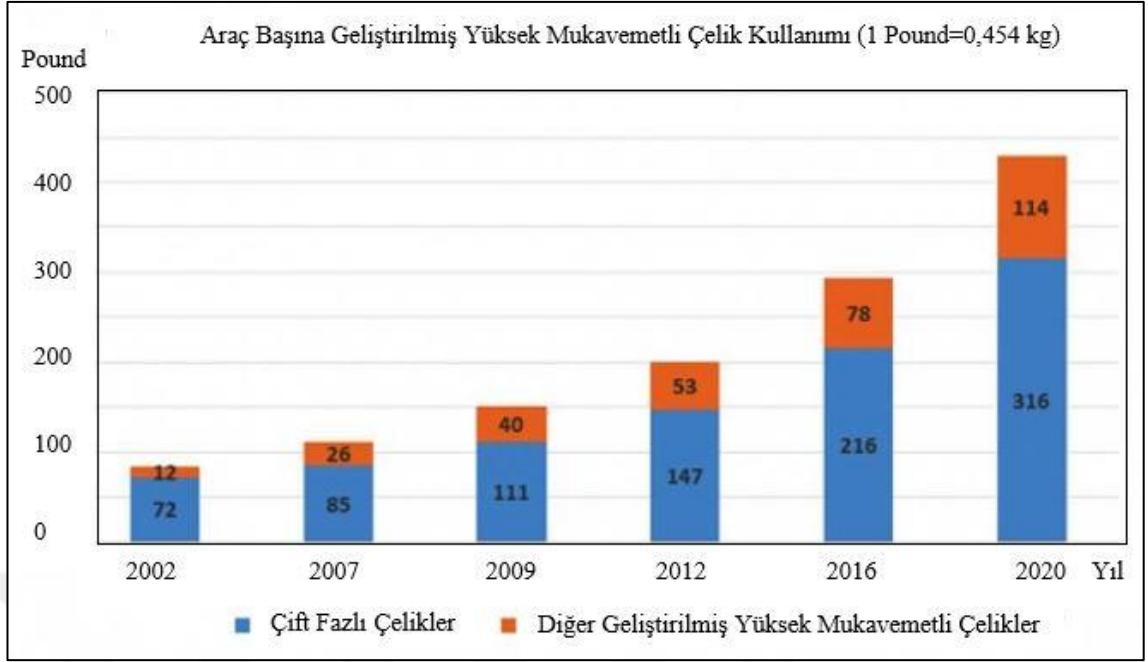
**Şekil 2.6.** Çift fazlı çeliklerde işlem yolunun şematik gösterimi ve her bir aşamadaki ve termo-mekanik işlemin her bir aşamada beklenen dayanım artırma mekanizması (Khosravani ve ark. 2017)

Çift fazlı çeliklerde hacimsel genişleme eşliğinde gerçekleşen ostenit martenzit dönüşümü mobil dislokasyonların ferrit matris çevresine yerleşmesine neden olur. Bu dislokasyonların hareketliliği, DP çeliğindeki yüksek ilk pekleşme sertleşmesi ve sürekli deformasyonun nedenidir. Fakat sadece iyi mekanik performans gerekli değildir. Uygulama safhasında özellikle kaynaklı bağlantılarda iyi kaynak edilebilirlik beklenir. DP çeliklerinin faydalı özellikleri Tailor-Welded saclarda fayda sağlayabilir ve bu saclar DP ve fırında sertleştirilen çeliklerden oluşabilir. Bu çeliklerden oluşan Tailor-Welded saclar şekillendirme ve çarpışma sırasında farklı yerel yükleme koşullarına adaptasyon sağlar (P. Svec ve A. Schrek 2016).

Günümüzde çeşitli kalitelere DP çelikleri çatı dış panelleri, kapı dış paneli, gövde tarafı dış paneli, yan darbe kirişleri ve tampon gibi bazı yüksek mukavemet gerektiren otomobil gövde parçalarında kullanılmaktadır. Bu parçalarda daha önceleri yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler kullanılmaktaydı (Parkes ve ark. 2014). DP çeliklerinde martenzitin hacimsel oranı çeliğin mukavemet ve kalite sınıfını belirlemektedir. Örneğin DP600 çeliği minimum 600 MPa çekme mukavemeti gösterirken, DP780, DP980 ve DP1180 çelikleri sırasıyla minimum 780 MPa, 980 MPa ve 1180 MPa çekme mukavemetleri göstermektedir (Biro ve ark. 2014).

Tailor-Welded saclar üretmek için çift fazlı DP çelikleri kullanılmaktadır. Tailor-Welded saclar şekillendirme işleminden önce birbirine kaynaklanan en az iki sacdan oluşan yarı mamul parçalardır. Birleştirilecek saclar farklı mekanik özellikler, kalınlıklar veya kaplama özellikleri gösterebilir. Seri üretimde sacların birleştirilmesi genellikle lazer kaynağı ile yapılır ancak başka kaynak teknikleri de mümkündür. Tailor-Welded sacların birleştirilmesinde en çok kullanılan endüstriyel lazerler CO<sub>2</sub> (dalga boyu= $\lambda$ =10,600 nm), fiber ( $\lambda$ =1064 nm) ve Nd:YAG ( $\lambda$ =1064 nm) türleridir. Tailor-Welded sacları kullanmak lokal olarak farklı yükleme koşullarına veya parçadaki diğer gereksinimlere adaptasyon sağlar. Şekillendirme işleminden önce birleştirmenin bir diğer avantajı şekillendirme aletlerinin sayısının azaltılması, şekillendirme işleminin daha yüksek doğruluk ve daha az üretim maliyetine yol açan malzemenin gelişmiş kullanımınıdır. Tailor-Welded saclar ve yüksek mukavemetli çelikler kullanılarak üretilen bir otomobil gövdesi ağırlıkça %25 azaltılabilmektedir (Slovaca 2015, Sharma ve Molian 2011).

Bir otomotiv uygulaması için malzeme seçimi, üretilen parçanın işlevine, ortamına ve gereksinimlerine bağlıdır. AHSS mikro yapısı, her uygulama için tasarlanan özel istekleri sağlamak için uyarlanabilir. Bu nedenle AHSS kalitesinde çeliklerin otomotiv endüstrisinde kullanımı giderek artmakta ve DP çelikleri bu alanda lider konumunda bulunmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. DP çeliklerinin yıllara göre araç başı kullanım miktarı (Anonim 2019a)

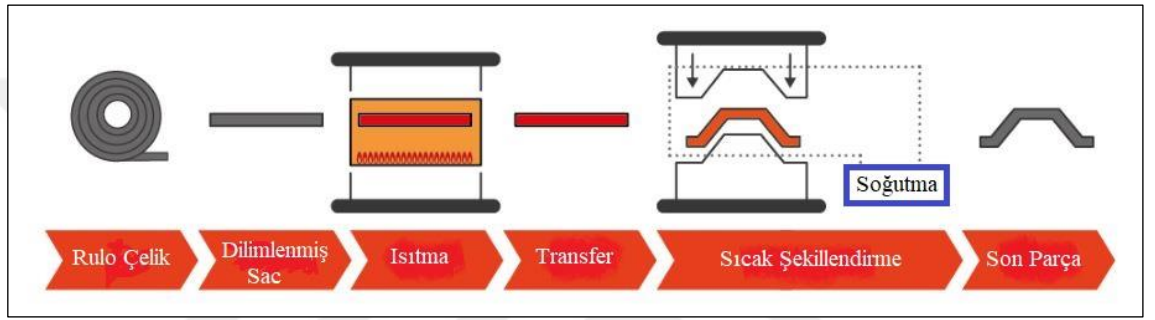


### 2.3 Usibor 1500 Çeliği

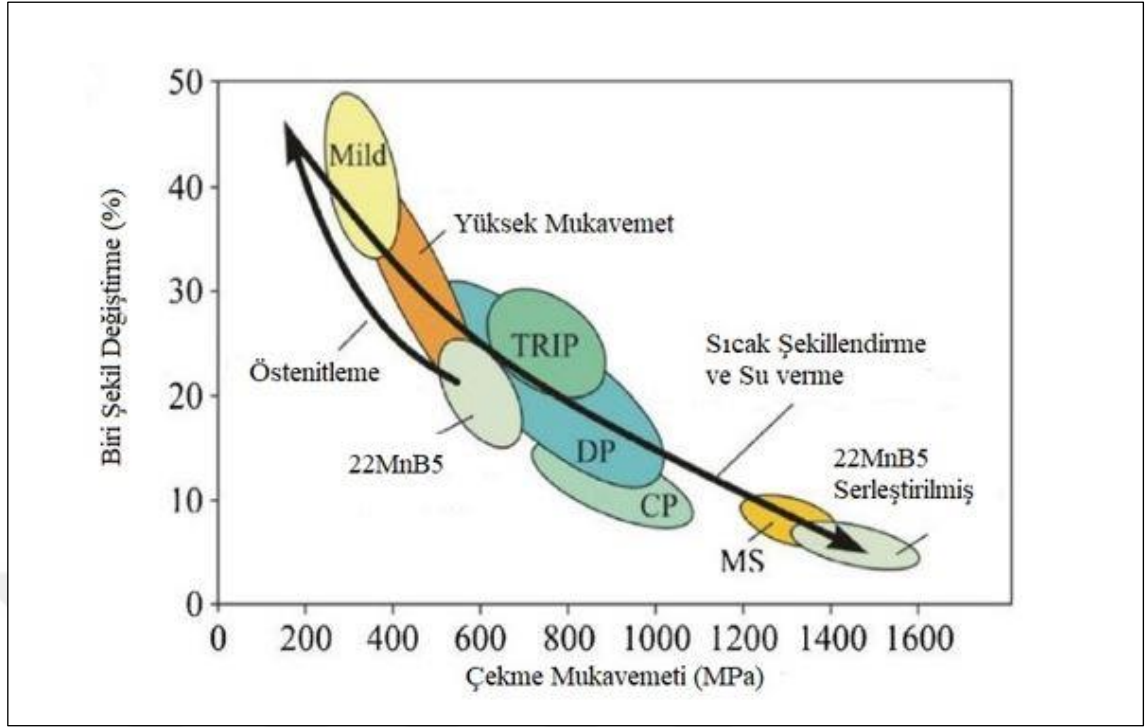
Son yıllarda, çarpışma dayanımından ödün vermeden yakıt tüketimini ve sera gazı salınımını azaltmak için hafif yapısal araç bileşenleri üretmek için önemli araştırma çabaları gösterilmektedir. Bu yüzden de otomotiv ve çelik endüstrileri geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikleri ve ultra yüksek mukavemetli çelikleri geliştirmektedirler. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler geleneksel yumuşak çeliklere göre daha yüksek mukavemet ve daha az şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir. Sıcak şekillendirilmiş parçalar, araç ağırlığının azaltılması ve çarpışma kabiliyetinin artması nedeniyle otomotiv endüstrisinde giderek daha popüler hale gelmektedir. Sıcak presleme, şekillendirme işlemlerinin en verimli yöntemlerinden biridir. Sıcak şekillendirme işlemi SSAB Hardtech ile birleştirilen ve bugün Gestamp Hardtech olarak bilinen NJA tarafından 1974 yılında geliştirildi ve patentlendi (Güler 2013, Choi ve ark. 2014, Arias ve ark. 2018).

Usibor1500 (22MnB5) gibi alaşımlı tamamen martenzitik mikro yapıya sahip çelikler otomotiv endüstrisinde kullanılan ticari geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler arasında en yüksek mukavemet değerlerine sahip çelik türlerinden biridir. Bu kalite bir çelik yeterli özelliklere ostenitleme, pres cihazına aktarma, kapalı preslerde sıcak şekillendirme ve preste su verme işlemlerinden sonra ulaşabilmektedir (Şekil 2.8). Düşük şekillendirilebilirliğin üstesinden gelebilmek için bor alaşımlı çelik  $AC_3$  sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta (yaklaşık olarak  $900-930^{\circ}C$ ) sıcak şekillendirme işlemine tabi tutulur ve bu nedenle sıcak şekillendirme çeliği (hot forming) olarak isimlendirilir. Bu aşamada  $900-930^{\circ}C$  arasında çelik tamamen ostenitik içyapıya sahiptir. Burada dikkat edilmesi gereken husus tane irileşmesine neden vermeyecek şekilde ostenitlemenin gerçekleştirilmesidir. Yaklaşık olarak 5-8 dakika bu sıcaklıklarda beklemek yeterlidir. Bu sürenin aşılması (yüksek sıcaklıklarda uzun süre tutma) kaçınılmaz olarak, ısıl işlem sırasında ortam atmosferi ile etkileşime bağlı olarak aşırı oksidasyon ve dekarburizasyona neden olur. Tutma süresi tamamen ostenitleştirmeye ve homojen bir mikro yapı elde etmeyi sağlamaya yetecek kadar olmalıdır. Malzeme daha sonra kalıba aktarılır. Kalıpta parça geometrisini ve istenen sertleştirilmiş mikro yapıyı üretmek için aynı anda sıcak şekillendirilir ve soğutulur. Sıcak şekillendirme Usibor1500 (22MnB5) çeliğine

uygulanan işlemler sırasında mekanik özelliklerin değişimi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Usibor1500 çeliğinin şekillendirme öncesi çekme mukavemeti yaklaşık olarak 600 MPa ve mikro yapısı ferritik-perlitik iken, sıcak şekillendirme ve kritik soğuma hızının üzerindeki hızlarda soğuma işlemi (hot stamping) ile martenzitik yapıya dönüşmektedir. Ostenitin tamamen martenzite dönüşebilmesi ve 1500 MPa çekme mukavemet değerinin yakalanabilmesi için soğuma hızının  $27^{\circ}\text{C}/\text{sn}$ ’nin üzerinde olması gerekmektedir. (Aras ve ark. 2018, Turetta ve ark. 2006, Geiger ve ark. 2005, Razmpoosh ve ark. 2019, Önal ve Kaya 2014, Jong ve ark. 2011).



Şekil 2.8. Sıcak şekillendirme işlemleri (Anonim 2019d)



**Şekil 2.9.** Sıcak şekillendirme işlemleri ile mekanik özelliklerin değişimi (Aziz ve Aqida 2013)

Usibor1500 (22MnB5) presle sertleştirme aşamasında yüksek sertleşme, yüksek mukavemet ve iyi şekil verilebilirlik nedeniyle sıcak şekillendirme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir çeliktir. Usibor1500 çeliği düşük karbon oranına sahip olmasına rağmen özellikle içerdiği mangan ve bor (yaklaşık olarak %0,001-0,005) elementlerinin güçlü sertleştirme etkisi ile çeliğin akma mukavemeti 1100 MPa'ın çekme mukavemeti 1500 MPa'ın üzerine çıkmakta ve %3-12 şekil değiştirme elde edilebilmektedir. Ayrıca bu çeliğe yüksek sıcaklıkta şekillendirme esnasında oksidasyonu ve atmosferik korozyonu önlemek için Al-Si ve Zn kaplamaları gibi çeşitli kaplamalar uygulanmaktadır. Al-Si kaplama yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direnci gösterdiğinden 400°C ergime sıcaklığına sahip olan Zn kaplamadan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Presle sıcak sertleştirilebilen Usibor çeliğinin yüksek mukavemet, yüksek şekillendirilebilirlik, minimum geri yaylanma ve yüksek boyutsal hassasiyet gibi avantajları vardır. Bu avantajlı özellikleri nedeniyle aracın şasi parçalarında (A direkleri, B direkleri, enine kiriş, tampon, tavan direği ve tünel) uygulama potansiyeline sahiptir. (Kim ve ark. 2011, Razmpoosh ve ark. 2018, Aras ve ark. 2018, Boher ve ark. 2012, Rossini ve ark. 2015, Liang ve ark. 2016).

## 2.4 Lazer Teknolojisi

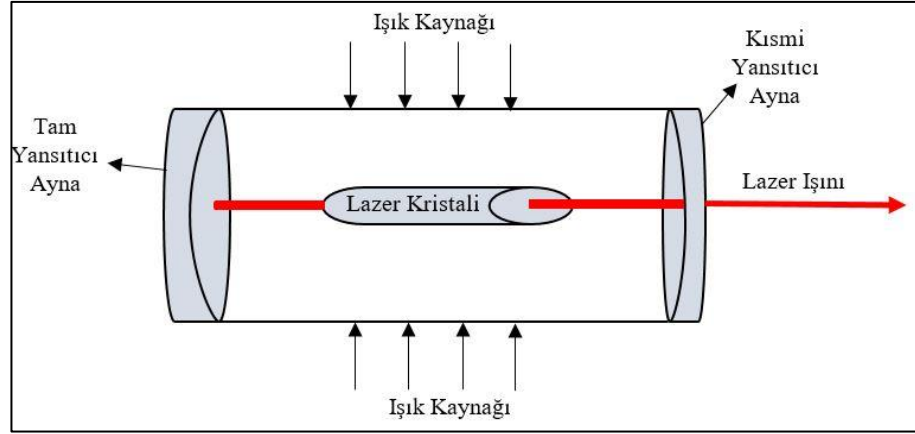
“Lazer” kelimesi ilk olarak 1960 yılında T.H. Miaman tarafından ingilizce “**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation” kelimelerinin ilk harflerinden yararlanarak oluşturulmuştur. Türkçe olarak uyarılmış ışımının yayılımı ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelmektedir. Lazerler koherent ve tek renk güçlü ışık elde etmek için oluşturulan optik düzeneklerdir (Güneş 2012).

Bir lazer sistemi üç ana bileşenden oluşur (Thomas ve Isaacs 2011, Black ve Jobling 2014) (Şekil 2.10):

**Kalıcı Ortam:** Katı (kristaller veya yarı iletkenler), sıvı (organik boyalar) veya bir gaz (veya gaz karışımı) olabilir.

**Tahrik Sistemi veya Pompa:** Bu, kalıcı ortama gerekli enerjiyi sağlayarak ışık güçlendirme koşullarını yaratır. Farklı pompalama sistemleri vardır: optik (flaş lambaları, sürekli ark lambaları, tungsten-filament lambalar ve hatta diğer lazerler), elektrik (gaz deşarj tüpleri, yarı iletkenlerde elektrik akımı) veya kimyasal pompalar.

**Optik Rezenatör:** En basit haliyle, fotonların kalıcı ortamın uzunluğu boyunca ileri ve geri gidecek şekilde düzenlendiği iki aynadan oluşur. Tipik olarak, bir ayna ışının çıkmasını sağlamak için kısmen saydamdır.



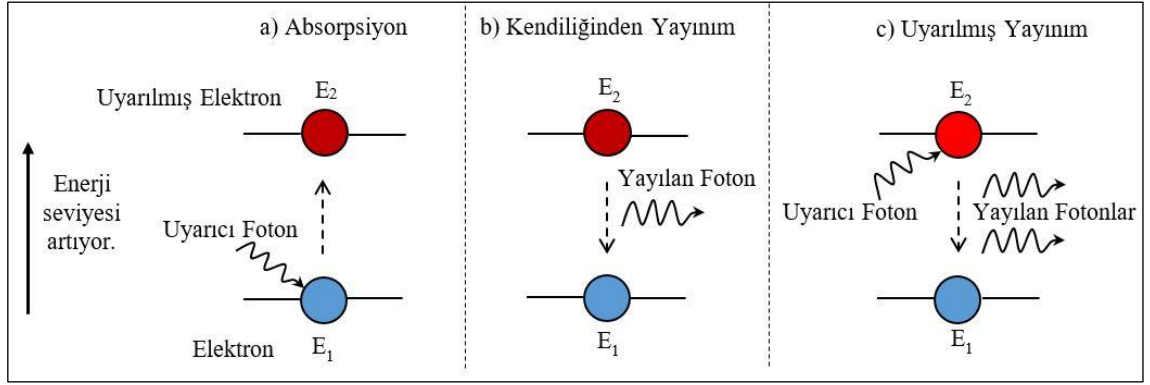
**Şekil 2.10.** Tipik bir lazer üretim cihazının şematik gösterimi

Kalıcı ortam, merkezi proton çekirdeğine sahip atomlardan ve farklı yörünge kabukları içerisinde elektronlarla çevrili nötronlardan ibaret olarak kabul edilebilir. Bu elektronlar, atomun dış enerjisi emmesi veya salması gibi farklı enerji seviyeleri arasında hareket eder. Elektronlar ve fotonların enerjisi arasındaki etkileşimi vurgulayan üç farklı mekanizma mevcuttur (Şekil 2.11)(Thomas ve Isaacs 2011, Black ve Jobling 2014).

**Absorbsiyon:** Temel enerji seviyesinde ( $E_1$ ) bir elektron, bir fotonunun enerjisini absorbe eder ( $h\nu$ ) ve bir üst seviyeye ( $E_2$ ) geçer.  $h$ , Planck sabiti ( $6,63 \cdot 10^{-24} \text{ J/s}$ ) ve  $\nu$ , frekanstır.

**Kendiliğinden Yayınım:** Üst seviyedeki bir elektron ( $E_2$ ) kendiliğinden alt seviyeye ( $E_1$ ) düşer. Bu şekilde, rastgele bir yöne ve faza sahip  $h\nu$  enerjili bir foton yayılır.

**Uyarılmış Yayınım:**  $E_2$  enerji seviyesindeki atoma belirli bir yön, dalga boyu ve fazdaki fotonla uyarılırsa uyaran atomun özellikleri ile aynı eşdeğer iki foton yayılır.



**Şekil 2.11.** a) Uyarım ile elektronun enerjisinin arttırılması b) Kendiliğinden yayınım c) Uyarılmış yayınım

Lazer teknolojileri ve lazer kaynağı yüksek hassasiyet, yüksek verimlilik, esneklik, otomasyona uygunluk gibi endüstriyel uygulamalara açık avantajlarından dolayı yeni bir teknolojik çağ başlatmıştır (Iordachescu ve ark. 2011). Endüstride katı hal lazerlerin uygulanması özellikle fiber ve Nd:YAG gibi türlerinin teknik parametrelerinin  $\text{CO}_2$  lazerinin parametrelerini aşması nedeniyle artmaktadır.

Katı hal lazerinin en önemli avantajları (Evin ve Tom 2017):

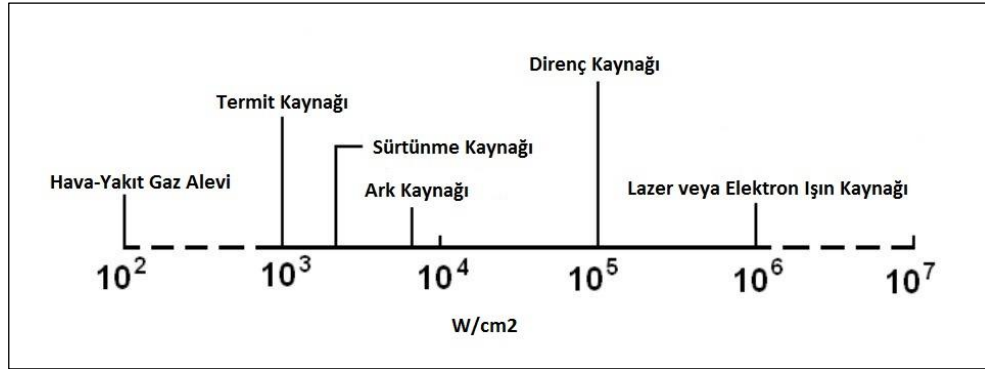
- Elektrik enerjisinin lazer ışını enerjisine dönüşüm verimi,  $\text{CO}_2$  lazerlere kıyasla %30 daha yüksektir.
- Daha yüksek odaklanabilirlik sayesinde endüstride daha geniş uygulama alanı.
- Daha stabil ve esnek çıktı parametreleri.
- Daha iyi lazer ışını kalitesi.
- İletimin optik fiber kablolar ile yapılması.
- Daha iyi emilim.

## Fiber lazerin endüstriyel uygulamaları (Singla 2017)

- İş parçasının iş istasyonunda taşınmasını gerektirmemesi, kalın kesitlerin ve büyük çelik yapıların kaynağında kullanımına izin verir.
- Gaz boru hatlarının kaynağında kullanımı çok önemlidir.
- Otomotiv, havacılık, medikal ve elektronik endüstrisi, fiber lazer kaynağının faydalarından en fazla yararlanmaktadır.
- Savunma sanayinde ve elektronikte güneş pilleri üretiminde kullanılmaktadır.
- Bazı fiber lazer kaynak örnekleri, radar bileşenleri, sensörler, iletkenler, insülin pompası kutuları, akü muhafazası, kalp pilleri vb.

## 2.5 Lazer Kaynağı

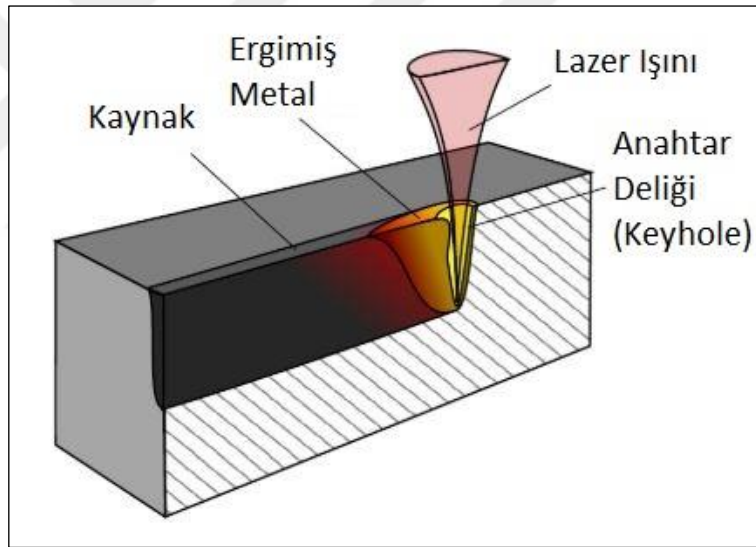
Lazerler, 1960'larda yüksek güçlü gaz ve katı hal lazerlerinin icadından bu yana malzemelerin birleştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Lazer kaynağı çeşitli kalınlık ve tiplerde çok çeşitli malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlayan hızlı ve hassas bir teknolojidir (Xu ve ark. 2012). Lazer kaynağı yüksek güç seviyesi, yüksek ışın kalitesi, yüksek kaynak hızı, yüksek hassasiyet, güvenilirlik, boşluksuz kaynak üretebilme kabiliyeti, yüksek verimlilik ve yüksek performans gibi birçok avantajlı özelliğinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen ve ark. 2011). Yüksek güç yoğunluğu ve yüksek ışın kalitesi yüksek kaynak nüfuziyeti sağlamaktadır (Farrokhi ve ark. 2019). Lazer kaynağı için mevcut uygulamalar arasında otomotiv, havacılık, savunma, denizcilik ve gemi yapımı, tıp, elektronik, elektrik üretimi ve şebekeleri, kimya endüstrisi, alternatif enerji (yakıt hücreleri, güneş enerjisi ve rüzgar türbinleri), nükleer, petrol, gaz, karayolu ve ev aletleri gibi sektörler yer almaktadır (Iordachescu ve ark. 2011). Lazer kaynağının sağladığı en büyük avantajlardan birisi yüksek güç yoğunluğudur. Lazer kaynağının güç yoğunluğunun diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslanması Şekil 2.12'de gösterilmiştir (Koleva ve ark. 2015).



**Şekil 2.12.** Diğer kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu ile karşılaştırıldığında lazer kaynağının yeri (Koleva ve ark. 2015)



Otomotiv endüstrisinde özellikle anahtar deliği modundaki lazer kaynağı yüksek güç yoğunluğunun sağladığı daha derin nüfuziyet ve dar kaynak dikişi sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.13). Bu sayede lazer kaynağı öncesinde özel bir hazırlık ya da ilave dolgu metaline ihtiyaç duyulmamaktadır. Lazer kaynağında, üretim hızını önemli ölçüde arttıran yüksek güç yoğunluğundan dolayı yüksek kaynak hızları elde edilir. Lazer kaynağında yüksek güç yoğunluğu ve kaynak hızının birleşimi ergime bölgesi (EB) ve ITAB'ın uzaması gibi kaynak kesitindeki metalürjik heterojenlikleri en aza indiren düşük ısı girdisi sağlamaktadır. Düşük ısı girişi aynı zamanda kaynaklı parçalardaki termal çarpılmaları azaltır ve kaynak sonrası işlem gereksinimlerini en aza indirir. Belirtilen avantajlarından dolayı özellikle otomobil gövde parçalarının birleştirilmesinde lazer kaynağı potansiyel bir yöntemdir (Nayak ve ark. 2015, Yuce ve ark. 2016).



**Şekil 2.13.** Lazer nüfuziyet kaynağı şematik gösterimi (Anonim 2019c)

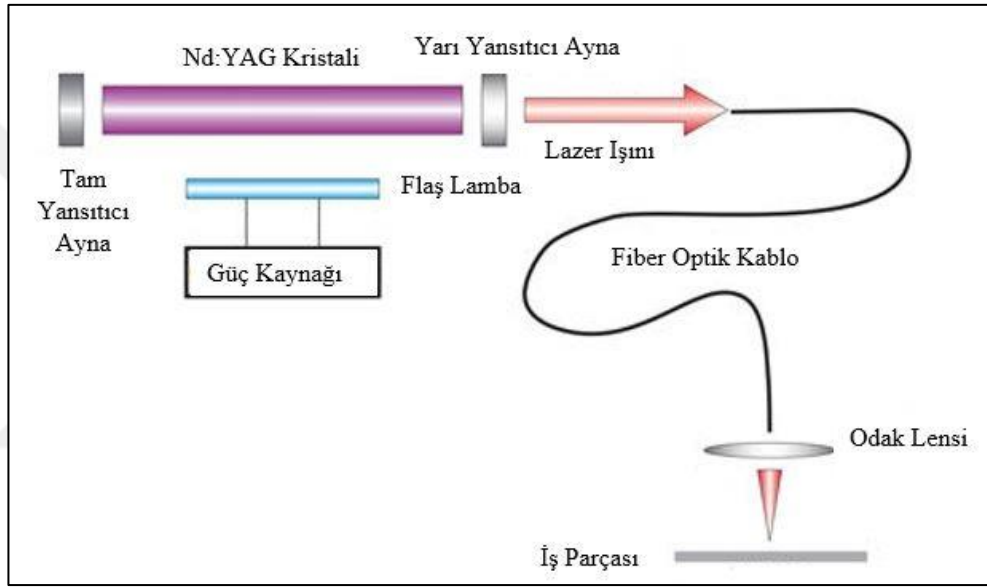
Fiber lazer kaynağı, diyot lazer kaynağı, Nd:YAG lazer kaynağı ve CO<sub>2</sub> lazer kaynağı çeliklerin kaynak edilmesinde uygulanan başlıca lazer kaynak teknikleridir (Parkes ve ark. 2013). Lazer kaynak işleminde lazer ışınımının emilmesi malzemenin yüzey tabakasının bölgesel olarak ısınmasına neden olur.  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>'den büyük bir enerjinin emilmesi ise malzemenin sadece ergimesine değil aynı zamanda buharlaşmasına da yol açar. Lazer ışını odak noktası kaynak dikişi boyunca hareket ederken, yerel bir ergime,

bir anahtar deliği (buhar kanalı) malzeme boyunca ilerler ve ergiyen malzeme duvarları arkadan anahtar deliğini doldurur. Bu yolla metal hareket istikametinde eritilmiş ve geride kalan eritilmiş kısım katılaşmış olur. (Sokolov ve ark. 2011, Uzun ve Keleş 2012) (Şekil 2.13).

Lazer kaynak yöntemi dar ITAB ve EB, düşük maliyet ve diğer kaynak yöntemlerine göre esneklik gibi avantajlarından dolayı Tailor-welded saclar oluşturmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Her ne kadar lazer kaynak yöntemi malzeme özellikleri üzerinde diğer kaynak yöntemlerine göre daha az etki yaratsa da Tailor-Welded sacların şekillendirilebilirliği lazer kaynağı ile değişen mikro yapı ve malzeme özelliklerinden dolayı kötüleşmektedir. Mikro yapı, başlangıç malzemesi (BM) kimyasal bileşiminden, sac kalınlığından ve güç girişı ve kaynak hızı gibi diğer kaynak parametrelerinden de etkilenir. EB ve ITAB'da oluşan son mikro yapı hızlı ısıtma ve soğuma sonucu oluşan ergime ve katılaşmanın sonucudur. EB ve ITAB artan sertlik ve azalan plastik özellikler ile karakterize edilir. Kaynak parametrelerinin uygun seçimi Tailor-Welded çeliklerinde gerekli mikro yapıların oluşumu için önemlidir (Slovaca 2015).

### 2.5.1 Nd:YAG Lazer Kaynağı

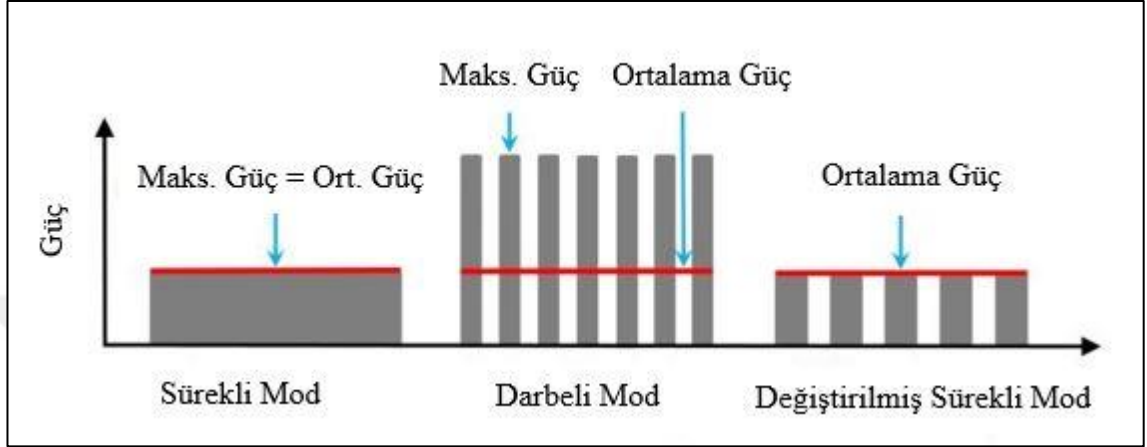
Günümüzde, Nd: YAG (Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet) lazeri, nispeten yüksek hızda, yüksek kalitede kaynak yapma kapasitesi nedeniyle, en çok kullanılan lazerlerinden biridir. Yüksek penetrasyon kapasitesi ve işlemi otomatikleştirmenin nispeten kolay olması bu lazer türünün diğer avantajlarıdır (Fernandes ve ark. 2017). Nd:YAG lazer kaynak cihazının temel elemanları ve şematik gösterimi Şekil 2.14'te verilmiştir.



**Şekil 2.14.** Nd:YAG lazer kaynağında ışının üretilmesi ve fiber optik kablo ile yönlendirilmesinin şematik gösterimi

Nd:YAG lazer kaynağı darbeli ve sürekli modda çalışabilme özelliklerine sahiptir. Sürekli mod, darbeli mod ve değiştirilmiş sürekli modda güç çıkışı Şekil 2.15'te gösterilmektedir. Darbeli bir Nd: YAG lazer sistemi ile kaynak, kaynak havuzunun periyodik olarak ısıtılması ve art arda meydana gelen erime ve katılaşmanın gerçekleşmesine izin veren yüksek maksimum güç yoğunluğuna sahip bir darbeli lazer ışını ile karakterize edilir (Afonso ve ark. 2010, Meng ve ark. 2015). Düşük ortalama güç ve yüksek maksimum darbe gücüne sahip darbeli Nd:YAG lazer kaynağı dar bir ITAB ve düşük kalıntı gerilmelerin yanında yumuşama derecesindeki azaltmak için avantajlıdır (Q. Sun ve ark. 2016). Darbeli Nd: YAG lazer kaynağı, yüksek üretim verimliliği ve darbe

süresi ve darbe frekansı gibi parametreleri kontrol etme kabiliyeti nedeniyle diğer lazer kaynakları arasında ilgi çekicidir. Nd:YAG lazer kaynağında etkin lazer parametreleri; darbe süresi (ms), darbe gücü (kW), darbe enerjisi (joule) frekans (hz), ışın çapı (mm) ve kaynak hızıdır (mm/sn) (Sivagurumanikandan ve ark. 2018).



**Şekil 2.15.** Farklı türdeki lazer modlarının şematik gösterimi (Meng ve ark. 2015)

Nd:YAG lazer kaynağı uygulama alanları yüksek çıkış gücünün geliştirilmesi, lazer ışını kalitesinin iyileştirilmesi ve fiber dağıtım olasılığına bağlıdır (Hekmatjou ve Naffakh-Moosavy 2018). Nd: YAG lazer kaynağı, otomotiv, elektrik ve elektronik endüstrilerine büyük ilgi duyulan bir birleştirme teknolojisidir. Nd: YAG darbeli lazer kaynağının diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha hassas bir ısı kontrolü sağladığı için tercih edilen yöntem olması beklenmektedir. Özellikle kaynak parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilebiliyor olması sebebiyle gemi yapımı, savunma ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nd:YAG lazer kaynağı yüksek kaynak derinlik-genişlik oranına sahiptir. Ayrıca, ITAB genişliğini, kalıntı gerilmelerini ve süreksizliklerin varlığını azaltır (Baghjari ve Akbari Mousavi 2013, Torkamany ve ark. 2014). Darbeli Nd:YAG lazer kaynağında ısı girdisi aşağıdaki denklemler ile hesaplanır:

Ortalama güç (W): maksimum güç (kW) x darbe süresi (ms) x frekans (hz)

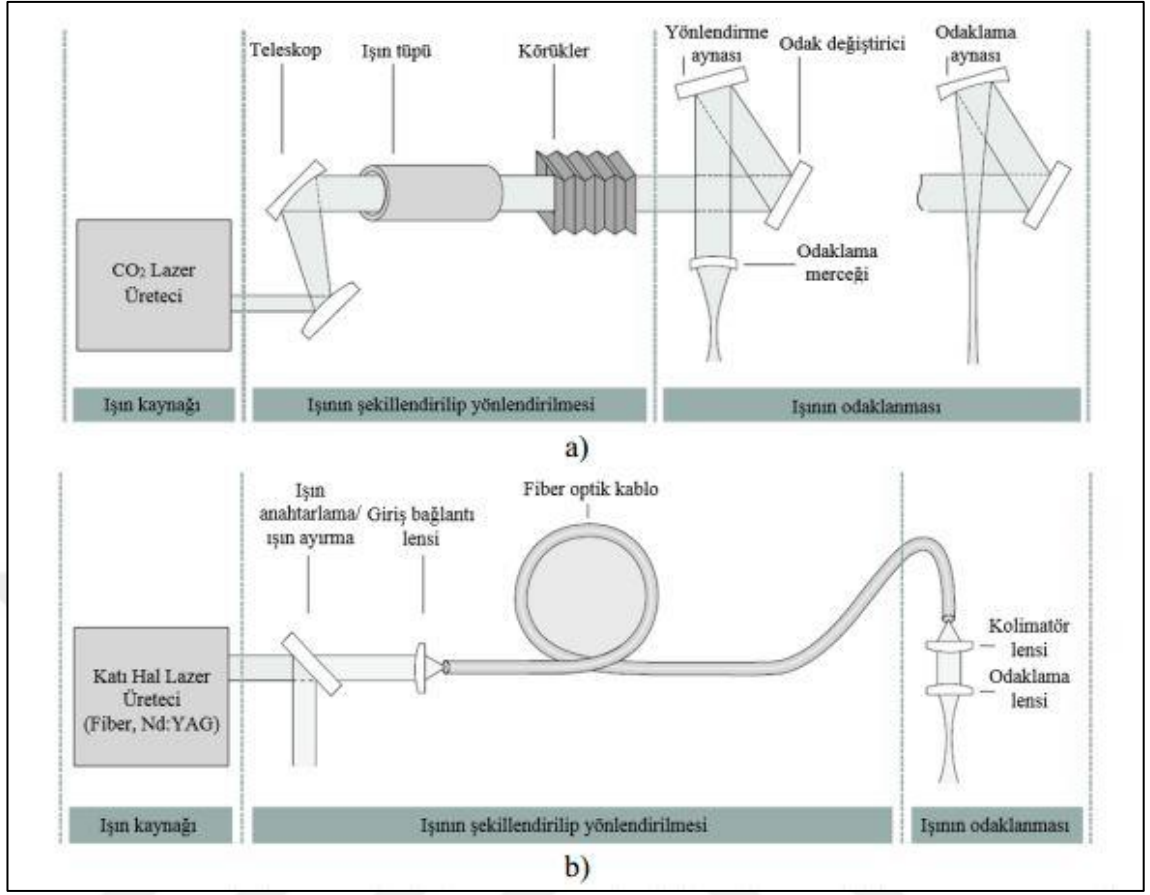
Isı girdisi (J/mm): ortalama güç (W) / kaynak hızı (mm/sn)

### 2.5.2 Fiber Lazer Kaynağı

Ticari lazer sistemleri arasında endüstriyel uygulamalarda, mükemmel ışın kalitesine ve yüksek parlaklığa sahip yüksek güçlü yeni nesil fiber lazerler son yıllarda artan şekilde ilgi görmektedirler (H. Chen ve ark. 2011). Piyasada bulunan yüksek güçlü fiber lazerler 1,07 mikronluk dalga boyu yayan iterbiyum katkılı çok katlı fiber bobinlerden yapılır. Fiber lazerler fiber optik ortamda iletimi sağlarlar. Düşük lazer dalga boyu bu lazerlerde üretilen ısının hemen hepsinin metal ve alaşımlar tarafından emilmesini sağlamakta ve bu sayede yüksek penetrasyon derinlikleri yakalanabilmektedir. CO<sub>2</sub> lazer ışını ile karşılaştırıldığında, aynaların hizalanması ile uğraşmak zorunda kalmadan fiber kablolar kullanarak basitleştirilmiş ışın iletimi sağlar. CO<sub>2</sub> lazer ışınının ve katı hal fiber ve Nd:YAG ışınının yönlendirilmesi şematik olarak Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Fiber lazerler, daha küçük boyutlara odaklanma kabiliyeti sayesinde daha fazla güç yoğunluğu sağlar. Fiber lazerler 1960'ların başlarında geliştirilmişlerdir. Son zamanlarda fiber lazerler konusundaki yeni gelişmeler bu lazerlerin diğer birleştirme yöntemlerine göre birçok avantajı olmasını sağlamaktadır:

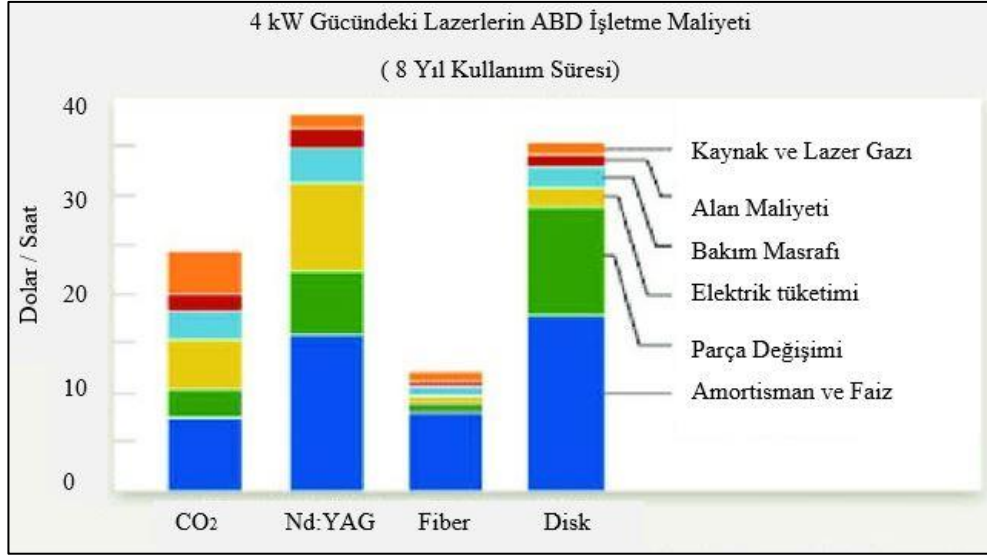
- Yüksek güç
- Düşük ışın sapması
- Kompakt tasarım
- Düşük bakım maliyetleri
- Esnek ışın iletimi
- Fiber-optik kablo sayesinde basit ışın iletimi
- Temiz kaynak yüzeyi
- Konsantre ısı kaynağı
- Yüksek verimlilik
- Yüksek hassasiyet
- Güvenilirlik

Böylece üstün kaliteli kaynaklar fiber lazeri ile üretilebilmektedir (Parkes ve ark. 2013, Singla 2017, Xu ve ark. 2013).



**Şekil 2.16.** Farklı lazer türlerinde ışının yönlendirilmesinin şematik gösterimi a) CO<sub>2</sub> lazeri, b) Katı Hal Lazer üretici (Fiber, Nd:YAG) (Yuce 2018)

Günümüzde kaynak cihazlarının teknik avantajlarından yararlanırken işletme maliyetlerini de hesaba katmak önemlidir. Endüstride malzemelerin kesilmesi, kaynak edilmesi ve yüzey işlenmesi gibi alanlarda kullanılan dört farklı ve eşit güce sahip lazer türünün sekiz yıl kullanım süresince işletme maliyetlerinin karşılaştırılması Şekil 2.17’de verilmiştir. Fiber lazerler işletme maliyeti olarak endüstride sıklıkla kullanılan diğer lazerlere göre çok avantajlı görülmektedir (Assunção ve ark. 2010).



**Şekil 2.17.** Dört farklı türde 4 kW güce sahip lazer için işletme maliyetlerinin karşılaştırılması

## 2.6 Lazer Alın Kaynağı

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler şekillendirme ve kalıp tasarımında yer alan sorunları ortadan kaldırmak için üretilirken alın kaynağı yapılandırmasında kaynak edilir. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin alın kaynağında çinko kaplama zararlı değil fakat bindirme kaynağında kullanılıyorsa zararlı olmaktadır. Bununla birlikte, lazer alın kaynağı diğer füzyon kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında dar ışın çapı nedeniyle kaynak edilecek parçaların hassas bir şekilde yerleştirilmesini ve hizalanmasını gerektirir. Ayrıca kaynak edilecek parçalar arasındaki herhangi bir boşluk kaynak performansını düşürebilen önemli kaynak boşluklarına neden olabilir. İlaveten kaynak edilecek parçaların yanlış hizalanması kaynaklı parçaların yorulma ömrünü azaltan bir çentik üretir (Nayak ve ark. 2015, Xue ve ark. 2017).

Lazer alın kaynağı ile yapılan bazı literatür çalışmaları ve elde edilen sonuçlar bu kısımda özetlemiştir. Dong ve ark. (2014) çalışmalarında 0,7 mm kalınlığında DP600 sacları Nd:YAG lazer alın kaynağı kullanarak birleştirmişler ve deformasyon oranının mekanik özellikler ve kırılma davranışına etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca kaynak sonrası alın kaynaklı DP çeliklerinde mikro yapı ve mikro sertlik değişimini belirlemişlerdir. Kaynak bölgesinde heterojen bir kaynak yapısı gözlenmiştir. EB ve ITAB'ın EB'ye yakın kısımlarında bölgesel sertlik artışları görülürken ITAB dış sınırı ile BM arasında yumuşama tespit etmişlerdir. SEM incelemelerinde EB'de tamamen martenzitik içyapı, ITAB'ın iç kısımlarında martenzit ve ferriten oluşan bir içyapı ve ITAB'ın dış kısımlarında temperlenmiş martenzitten oluşan bir içyapı görülmektedir. Fernandes ve ark. (2017) Nd:YAG lazer kaynağı ile alın şeklinde birleştirilen 0,8 mm kalınlığında DP600 saclarında optimum kaynak parametrelerini bulmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında bu kalınlık için optimum kaynak parametreleri sağlandığında alın kaynağının başarılı bir şekilde yapılabileceğini göstermişlerdir. Kaynak yapılacak parçaların hassas bir şekilde kesilmesinin kaynak kalitesi açısından ve iyi birleşme sağlamak açısından önemini de vurgulamışlardır. Di ve ark. (2017) 1,5 mm kalınlığında soğuk haddelenmiş DP780 ve DP980 sacları fiber lazer kaynağıyla eşit ısı girdilerinde benzer ve farklı türlerde alın alına birleştirip ITAB'da oluşan yumuşama bölgesinin kaynak bölgesi özelliklerine olan etkilerini çalışmışlardır. Ayrıca, benzer ve farklı türdeki



birleştirmelerde kaynak bölgesinde oluşan mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda üç farklı türde birleştirmenin de EB'si çubuk şeklinde martenzitten oluşmuştur. Benzer ve farklı türdeki ITAB mikro yapıları ise; çubuk martenzit (kaba taneli ısı tesiri altındaki bölge (KT-ITAB), ince taneli ısı tesiri altındaki bölge (İT-ITAB)), martenzit-kalıntı ostenit bileşimi ve ferrit (inter kritik ısı tesiri altındaki bölge (İK-ITAB)), temperlenmiş martenzit ve ferrit (alt kritik ısı tesiri altındaki bölge (AK-ITAB)) fazlarından oluşmaktadır. DP980 tarafının İK-ITAB ve AK-ITAB'da ise daha ince ferrit ve daha fazla martenzitten oluşan bir içyapı mevcuttur. DP780-DP980 birleştirmenin şekillendirilebilirliği ise benzer türdeki DP780-DP780 ve DP980-DP980 kombinasyonundaki bağlantılarla kıyaslandığında ise asimetric deformasyon ve her iki tarafta farklı yumuşama bölgeleri oluşması sebebiyle daha kötüdür. Guo ve ark. (2018) 1,36 mm kalınlığında QP980 çelik sacları fiber lazer kaynağı ile birleştirip kaynağın malzeme mekanik ve mikro yapı özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Fiber lazer kaynağı ile hatasız ve %100 verimlilikte birleştirme yapabilmışlerdir. EB tamamen martenzitik yapısından kaynaklı en yüksek sertliğe (493 HV) sahiptir. ITAB'da BM'deki martenzitin temperlenmesinden kaynaklanan temperlenmiş martenzit yumuşamaya neden olmasına rağmen dar ITAB ve çok şiddetli olmayan yumuşama bölgesi birleşmenin çekme mukavemetinde etkili olmamıştır. Jia ve ark. (2016) çalışmalarında 1,2 mm kalınlığındaki DP980 sacları fiber lazer kaynağı ile birleştirmişler ve deformasyon hızının mikro yapı, mikro sertlik ve çekme mukavemetine olan etkilerini araştırmışlardır. DP çeliklerinin kaynağında kaçınılmaz olan yumuşama bölgesinin varlığına rağmen tüm numuneler BM'den kırılmıştır. Ayrıca çalışmalarında kaynak bölgesindeki en yüksek sertlik değerlerine İT-ITAB'da ulaştıklarını da belirtmişlerdir. Jia ve ark. (2016) 1,2 mm kalınlığındaki farklı türdeki DP600 ve DP980 sacları odaklanmış lazer ışını ve odaklanmamış lazer ışını kullanarak fiber lazer kaynağı ile birleştirmişlerdir. Odaklanmamış lazer ışını EB genişliğini arttırırken, ITAB'da sementit çökmesini arttırarak yumuşamanın artmasına neden olmuştur. Parkes ve ark. (2013) 1,2 mm kalınlığında HSLA (Yüksek dayanımlı ve düşük alaşımlı çelik) ve DP980 çelik saclarını benzer ve farklı türlerde fiber lazer kaynağı ile birleştirip kaynak bölgesinin mikro yapı ve yorulma özelliklerini incelemişlerdir. HSLA-HSLA ve HSLA-DP980 birleştirmelerin yorulma dayanımı DP980-DP980 birleştirmeden düşük ve birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca farklı türdeki birleştirmede DP980 tarafında var olan yumuşama bölgesi çekme

mukavemetinin üzerine azaltıcı herhangi bir etki yapmamıştır. Parkes ve ark. (2014) 1,2 mm kalınlığında HSLA ve DP980 sacları fiber lazer kaynağı ile birleştirip sıcaklığın çekme testi sonuçlarına olan etkilerini incelemiştir. Çekme ve akma mukavemetleri düşük sıcaklıktan (-40°C) yüksek sıcaklığa(180°C) gittikçe azalmıştır. Saha ve ark. (2014) çalışmalarında 1,2 mm kalınlığında HSLA ve DP980 çeliklerini benzer ve farklı türlerde fiber lazer kaynağıyla birleştirmişlerdir. EB mikro yapısı malzemelerin kimyasal yapısına duyarlıdır. İki farklı malzemenin karışması zayıf kimyasal bağın oluşmasının nedeni olup bu sürekli soğuma diyagramını sola kaydırmıştır. Sertlik ölçüm hattı karışmanın tamamlanamadığını göstermekte ve homojen bir yapının oluşmaması sertleşebilirliği düşürmüştür. Wang ve ark. (2017) 1,5 mm kalınlığında DP780 çelik sacları fiber lazer kaynağı ile farklı ısı girdileri altında birleştirmişlerdir. Çalışmalarında ısı girdisinin mikro yapı ve kırılma davranışına olan etkilerini incelemiştir. Isı girdisinin düşük olduğu ve martenzitik içyapıya sahip numune kaynak merkezinden (KM'den) kırılmış ve küçük boyutlu ve sığ çukurcuklar oluşmuştur. Fakat yumuşama bölgesi ve BM'den kırılan numunelerde mikro yapı ve çukurcuk boyutu arasında bir kıyaslama net bir şekilde yapılamamıştır. Ayrıca ısı girdisindeki artışla birlikte martenzitin bozunması ve karbürlerin çökmesi daha belirgin olmuştur. Isı girdisindeki artışla yumuşama bölgesinde sertlik düşüşü daha fazla olmuş ve yumuşama bölgesinin genişliği artmıştır. Xu ve ark. (2012) 1,2 mm kalınlığındaki DP980 sacları tek lineer bir hatta ve çift lineer hatlarda fiber lazer kaynağı ile birleştirmişlerdir. Çift lineer hatta birleştirilen numuneye ait EB ısı girdisinin fazlalığından ve soğuma hızını yetersiz kalmasından dolayı ferrit, martenzit ve beynit fazlarından oluşan bir içyapıya sahipken, tek lineer hat boyunca kaynak edilen numunenin EB'si tamamen martenzitik içyapıya sahiptir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzemeler, yöntemler ve cihazlar tanıtılmıştır.

#### 3.1 Materyal

Kaynak işlemlerinde kullanılmak üzere 1,2 mm kalınlığında DP800, 2,5 mm kalınlığında DP1000, 1,2 mm kalınlığında DP1200 ve 1,1 mm kalınlığında Usibor1500 saclar ticari olarak temin edilmiştir. Kullanılan çelik sacların kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Deneylerde kullanılan DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 malzemelerinin kimyasal kompozisyonları (%ağırlık)

Malzeme	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr+Mo	Nb+Ti	Fe
DP800	0,18	0,8	2,5	0,015-2	0,08	0,015	1,4	0,15	Temel
DP1000	0,11	1	2,9	0,015-1	0,05	0,01	1,4	0,15	Temel
DP1200	0,23	1	2,9	0,15-1	0,05	0,01	1	0,15	Temel
Usibor 1500	0,227	0,231	1,13	0,034	0,017	0,002	0,19	0,036	Temel

**Çizelge 3.2.** Deneylerde kullanılan DP800, DP1000, DP1200 ve Usibor1500 malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama <sub>(min)</sub> (%)
DP800	450-550	780-900	16
DP1000	590-740	980-1130	11
DP1200	900-1100	1180-1350	6
Usibor 1500 (Su verilmemiş)	443	614	10
Usibor 1500 (Su verilmiş)	1100	1500	6

Çalışmada kullanılan Usibor 1500 saclar 100 mm x 260 mm boyutlarında parçalara bölündükten sonra 920°C'lik fırında 15 dakika tutulup sonrasında yağda soğutulmuştur. Isıl işlem öncesi ve sonrası mekanik özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

### 3.2 Deney Parametreleri

Çalışmanın başlarında Nd:YAG lazer kaynak yöntemi kullanılarak DP800 sacların kaliteli bir şekilde birleştirilebilirliği ve etkin kaynak parametrelerinden darbe süresi (ms), darbe gücü (kW), frekans (hz) ve ışın çapının (mm) mikro yapı ve mekanik özelliklere olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda belirlenen kaynak parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynak parametreleri

Numune Kodu	Darbe Süresi (ms)	Darbe Gücü (kW)	Frekans (hz)	Işın Çapı (mm)	Kaynak Hızı (mm/sn)
1	2,4	7	8	1,1	3
2	2,6	7	8	1,1	3
3	2,8	7	8	1,1	3
4	2,6	6,5	8	1,1	3
5	2,6	7,5	8	1,1	3
6	2,6	7	7,5	1,1	3
7	2,6	7	8,5	1,1	3
8	2,6	7	8	1	3
9	2,6	7	8	1,2	3

Nd:YAG lazer kaynak cihazıyla yapılan kaynaklarda yüksek kaynak mukavemeti ve kaynak penetrasyon derinliğine ulaşamamıştır. Bunun sonucunda fiber lazer kaynak cihazı kullanarak çalışmaya devam etmeye karar verilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında kaynaklar fiber lazer kaynak cihazı kullanılarak yapılmıştır. DP800-DP800, DP1000-DP1000, DP1200-DP1200 ve Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonlarında dört farklı çelik Çizelge 3.4-Çizelge 3.7'de belirtilen kaynak parametreleri kullanılarak

fiber kaynak cihazı ile alın şeklinde birleştirilmiştir. Fiber lazer kaynak işlemleri sırasında etkin kaynak parametrelerinden lazer gücü (W) ve ilerleme hızı (mm/sn) değiştirilmiş ve kaynak parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Kaynaklar sabit odak mesafesinde odakta (0) gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.4.** DP800-DP800 fiber lazer kaynak parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Lazer Gücü (W)</b>	<b>İlerleme Hızı (mm/sn)</b>	<b>Odak Mesafesi (mm)</b>
1	2750	50	0
2	2750	75	0
3	2750	100	0
4	2250	50	0
5	2250	75	0
6	2250	100	0
7	1750	50	0
8	1750	75	0
9	1750	100	0

**Çizelge 3.5.** DP1000-DP1000 fiber lazer kaynak parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Lazer Gücü (W)</b>	<b>İlerleme Hızı (mm/sn)</b>	<b>Odak Mesafesi (mm)</b>
1	2200	25	0
2	2200	50	0
3	2200	75	0
4	3000	25	0
5	3000	50	0
6	3000	75	0

**Çizelge 3.6.** DP1200-DP1200 fiber lazer kaynak parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Lazer Gücü (W)</b>	<b>İlerleme Hızı (mm/sn)</b>	<b>Odak Mesafesi (mm)</b>
1	2100	20	0
2	2100	40	0
3	2100	60	0
4	2100	80	0
5	2100	100	0
6	1500	60	0
7	1800	60	0
8	2400	60	0
9	2700	60	0

**Çizelge 3.7.** Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynak parametreleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Lazer Gücü (W)</b>	<b>İlerleme Hızı (mm/sn)</b>	<b>Odak Mesafesi (mm)</b>
1	1500	40	0
2	1500	80	0
3	1500	120	0
4	2000	40	0
5	2000	80	0
6	2000	120	0
7	2500	40	0
8	2500	80	0
9	2500	120	0

### 3.3 Lazer Kaynak Cihazları

DP800-DP800 Nd:YAG kaynağı işlemleri sırasında Sisma SWA300 marka lazer kaynak cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bu cihaz kalıp onarımlarında kullanılan herhangi bir boyuttaki parçayı kaynak edebilme kapasitesine sahiptir. Kaynak cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir. Çizelgede belirtilen cihaz parametreleri rezenatörden lazer ışın kafasına fiber ile geçiş için uygundur. Alın kaynak işlemleri esnasında kaynak bölgesini oksidasyondan korumak için kaynak bölgesine saf argon gazı 4 lt/dk miktarında uygulanmıştır. Lazer ışın çıkışı ile kaynak malzemesi arasındaki mesafe optimum sonuca 120 mm’de ulaşmaktadır. Kaynak işlemleri sırasında ilave bir dolgu teli kullanılmamıştır.

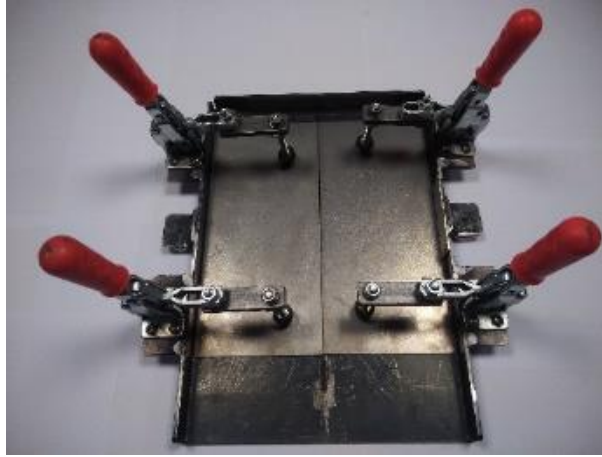


**Şekil 3.1.** Sisma SWA300 Nd:YAG lazer kaynak cihazı

**Çizelge 3.8.** Deneylerde kullanılan Sisma SWA 300 Nd:YAG lazer kaynak cihazının teknik özellikleri

Ortalama Güç	300 W
Max. Darbe Gücü	12 kW
Darbe Enerjisi	100 j
Darbe Frekansı	0-50 hz
Darbe Süresi	0,5-25 ms
Spot Çapı	0,6-2,0 mm
İlerleme Hızı	0-20 mm/s

Kaynak yapılacak numunelerin yüzeyleri arasında tam teması sağlayabilmek için imal edilen fikstür kaynak tezgahına sabitlendi. Alın kaynağı yapılacak plakaların doğru hizalanarak sabitlenmesi ve kaynak yüzeylerinin tam olarak örtüşmesi için üretilen fikstür Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.2.** Nd:YAG lazer kaynak işlemleri sırasında numuneleri sabitlemek için kullanılan fikstür

DP800-DP800, DP1000-DP1000, DP1200-DP1200 ve Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynak işlemleri altı eksenli KUKA kolu ile entegre çalışan lazer kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Maksimum 3 kW lazer gücüne sahip IPG marka lazer

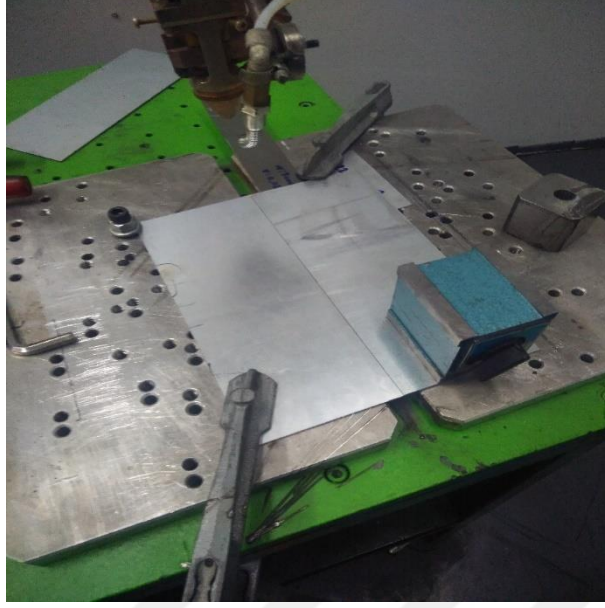


kaynak cihazı 1070  $\mu\text{m}$  dalga boyunda ışık üretmektedir. 0,2 mm proses fiberi kullanılan kaynak cihazında 100 mm kolimatör lensi, 200 mm odak lensi kullanılmaktadır. Odaklanmış haldeki lazerin spot çapı 0,4 mm'dir.



**Şekil 3.3.** Çalışmada kullanılan KUKA robot kollu fiber lazer kaynak cihazı

Alın kaynak işlemi sırasında hassas bir kaynak yapabilmek için plakaların sabitlenmesi önemlidir. Bu nedenle parçalar kaynak işlemi öncesi Şekil 3.4'te gösterildiği gibi sıkıca sabitlenmiştir. Ayrıca yüzeylerin tam olarak örtüşmesi için yüzey temizliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün de önemli olduğunu vurgulamak gerekmektedir.



**Şekil 3.4.** Fiber lazer kaynak işlemleri sırasında sabitlenmiş numune

### **3.4 Metalografik Muayene Numunesi Hazırlama İşlemleri**

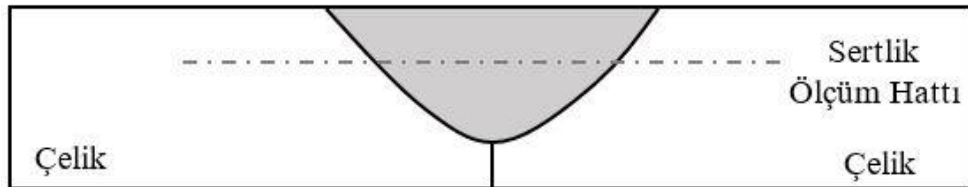
Kaynaklı plakalardan hassas kesme cihazı kullanarak metalografik muayene numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Metkon ECOPRESS 100 marka numune kalıplama cihazı kullanılarak sıcak kalıplanmıştır. Kalıplanan numuneler Metkon FORCIPOL 2V metalografik zımparalama ve parlatma cihazı ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Zımparalama işlemleri 180, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh'lik SiC su zımparaları kullanarak gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sırasıyla 3, 1 ve 0,25  $\mu\text{m}$ 'lik elmas süspansiyonlar ve çuhalar kullanılarak parlatılmıştır. Kaynak makro ve mikro yapısını ortaya çıkarmak için çelik malzemeler için yaygın olarak kullanılan %3'lük nital dağlayıcı pamuk ile yaklaşık olarak 5-10 sn sürülerek uygulanmıştır.

### 3.5 Optik Mikroskop Çalışmaları

Makro ve mikro yapı incelemeleri polarize ışık altında Clemex görüntü analiz sistemine sahip Nikon Eclipse marka MA100 marka 1000X büyütme kadar görüntü alabilme kapasitesine sahip ters metal mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak penetrasyon derinliği ve kaynak dikiş genişliği yine aynı cihaz kullanılarak ölçülmüştür. Isı girdisinin yüksek olduğu ve bu sebeple kaynak bölgesinin geniş olduğu numunelerde makro yapı görüntüleri 50X büyütmede çekilen fotoğraflar birleştirilerek yapılmıştır.

### 3.6 Mikro Sertlik Ölçümleri

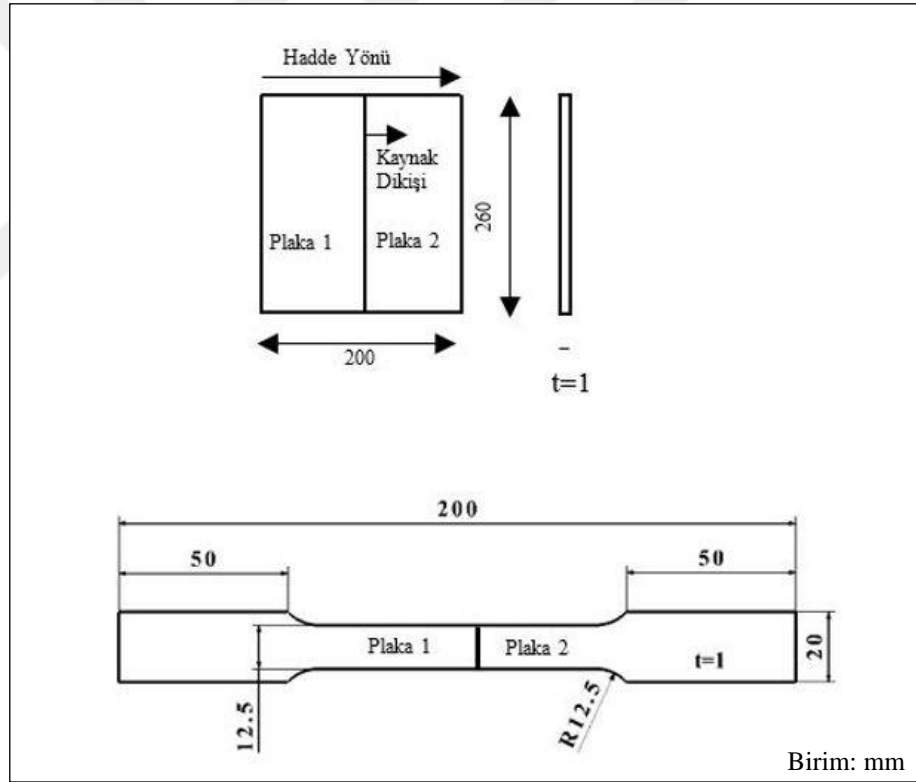
Optik mikroskop incelemeleri tamamlandıktan sonra Metkon marka Duroline-M Vickers sertlik ölçme cihazı kullanılarak mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri kaynak penetrasyon derinliğinin orta noktasından geçen yatay bir hat boyunca tüm kaynak bölgesini kapsayacak şekilde (EB, ITAB ve BM bölgelerini kapsamakta) gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Sertlik ölçümü sonucu elde edilen grafiklerde EB, ITAB, BM ve ITAB yumuşama bölgeleri işaretlenmiştir. Sertlik ölçümlerinde 200 gr yük 10 sn süresince uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri 0,1 mm aralıklarla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Kaynakla parçalardan mikro sertlik ölçümü alınan hat

### 3.7 Çekme Testleri

Kaynak işlemlerinden sonra 200 mm x 260 mm boyutlarında kaynaklı plakalardan hadde yönü ile çekme yönü paralel olacak şekilde ASTM E8/E8M standardına uygun çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Hazırlanan numunelerin çekme deneyleri Celtron marka yük hücresi ve MF (Mess-& Feinwerktechnik) marka otomatik ekstansometre (uzama ölçer) ile donatılmış UTEST-7014 marka universal çekme basma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer kaynak parametreleri ile birleştirilen her bir plakadan çıkarılan numunelerden en az beş adet çekme numunesine 5 mm/dk çene ilerleme hızında çekme testi uygulanmıştır. Çekme testlerinde elde edilen çekme mukavemeti ve yüzde uzama sonuçlarının ortalamaları alınmıştır. Ayrıca standart sapmalar da verilmiştir.



Şekil 3.6. Kaynaklı plaka ve çekme numunesinin şematik gösterimi (ASTM-E8/E8M 2009)

### 3.8 SEM Analizleri

Çekilen numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kırılma yüzeyi incelemelerinde 20 kV ZEISS EVO®40 XVP tipinde taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Ayrıca farklı malzemeler ile kendi aralarında birleştirilen numunelerden (DP800-DP800 Nd:YAG, DP800-D800 fiber, DP1000-DP1000 fiber, DP1200-DP1200 fiber, Usibor1500-Usibor1500 fiber) her bir kombinasyon için en düşük ısı girdisine sahip ve en yüksek ısı girdisine sahip numunelerin mikro yapı incelemeleri de ZEISS MERLIN SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM cihazında mikro yapı incelemesi yapılacak numuneler daha net ve kaliteli görüntü alabilmek için iletken bakalit tozu kullanılarak sıcak kalıplanmıştır. Ayrıca SEM mikro yapı incelemesi alınacak numuneler optik mikroskop numunelerine göre daha uzun süre dağlanmış. SEM-EDX ve SEM-EBSD incelemeleri de ZEISS MERLIN SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.9 EBSD Analizleri

Numunelerin içyapıları elektron geri-saçılım kırınımı (EBSD) tekniği temelli oryantasyon mikroskopisi kullanılarak karakterize edilmiştir. EBSD tekniği çelik içyapılarının güvenilir ve nicel olarak açıklanabilmesini sağlamaktadır (Petrov ve ark. 2007, Gourgues ve ark. 2000).

EBSD tekniğinin numuneyle etkileşim derinliği 5–10 nm arasında olduğu için numune yüzeylerinin hatalardan arındırılmış olarak hazırlanmasını gerektirmektedir (Zaefferer 2007). Hatalardan ve kabartılardan arındırılmış bir yüzey elde etmek için numune yüzeyleri standart SiC zımpara kağıtlarıyla hazırlandıktan sonra üç aşamalı (9, 3 ve 1 mikron elmas pasta solüsyonu kullanılarak) parlatılmıştır. Sonrasında numune yüzeyleri 0,05 mikron çapta koloidal silis partikülleri içeren OPS solüsyonluya 15 dakika boyunca son parlatma işleminden geçirilmiştir. Belirtilen metalografik hazırlama işlemlerinin tümü tam otomatik Struers Tegramin 25 cihazlarıyla yapılmıştır.

Oryantasyon mikroskopisi Zeiss Merlin FEG-SEM taramalı elektron mikroskobuna bağlı EDAX/TSL EBSD sistemi ve Hikari EBSD kamerası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroskobun ivmelendirme voltajı 15 kV, demet akımı 5 nA ve de çalışma mesafesi (WD) 13 mm olacak şekilde, altıgen bir rüt oluşturarak 50 nm ölçüm adımları kullanılarak EBSD haritaları çıkarılmıştır. EBSD kamerası 4x4 piksel gruplama yaparak (başka bir değişle EBSD deseni 160 x 120 piksel olacak şekilde) 20,0 milisaniye poz suresinde, 50 kare/s hızında çalıştırılmıştır. Tüm haritalar en aşağı 1000X büyütmede yaklaşık olarak 100µm x 100 µm'lik bir alanın taranmasıyla çıkarılarak, EBSD haritasını oluşturan tüm noktaların odaklanmış olması sağlanmıştır.

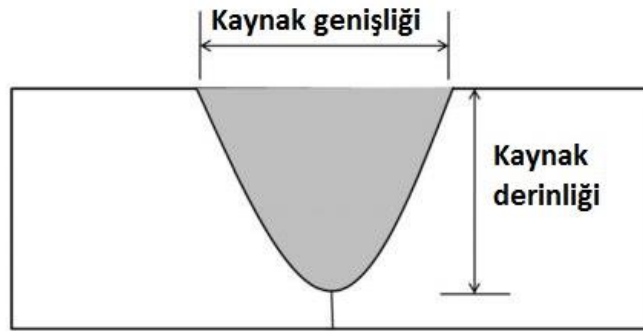
Ham EBSD verisi işlenirken, TSL OIM Analyisi v7.3.1 yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle; “tane indeksleme güveni standartlaştırması” (GCIS), yöntemi kullanılmıştır. GCIS, bir taneyi oluşturan ölçüm noktalarının tamamının indeksleme güveni değerlerini kontrol ederek, bulunan en yüksek değeri taneyi oluşturan tüm noktalara atar. Sonrasında indexleme güveni 0,1'in altında olan ölçüm noktaları analizlerden çıkarılmıştır. Bu veri-temizleme yöntemi EBSD haritasını oluşturan noktaların ölçülen yönlerini değiştirmemektedir. İçyapı, EBSD desen kalitesi (image quality, IQ), ters kutup şekli (inverse pole figure, IPF), tane sınırları yönelim farkı açısı (misorientation angle) değerlerine bakılarak karakterize edilmiştir. Analizlerde taneler, birbiri arasında 5°'den az yönelim farkı olan komşu piksellerin oluşturduğu kümeler olarak tanımlanmıştır.

#### 4. BULGULAR

Bu bölümde, DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynağı, DP800-DP800 fiber lazer kaynağı, DP1000-DP1000 fiber lazer kaynağı, DP1200-DP1200 fiber lazer kaynağı ve Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerde kaynak parametrelerinin makro yapı, mikro yapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Makro yapı ve mikro yapı çalışmaları kapsamında optik mikroskop, SEM ve EBSD teknikleri kullanılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde ise çekme testlerinden ve Vickers mikro sertlik testlerinden faydalanılmıştır. Çekme sonucu kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri de SEM ile analiz edilmiştir. Ayrıca kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini tespit etmek için varyans analizleri (Analysis of Variance-ANOVA) yapılmıştır.

##### 4.1 DP800-DP800 Nd:YAG Lazer Kaynaklı Numuneler

Bu başlık altında Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak (Çizelge 3.3) alın altına birleştirilen 1,2 mm kalınlığındaki DP800 saclara ait kaynaklı numunelerin makro yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Kaynak bölgesi makro yapı incelemesi sırasında kaynak kökünde birleşmenin sağlanamadığı Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerde kaynak derinliği ve kaynak genişliği ölçümleri Şekil 4.1’de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 4.1. Kaynak bölgesinin şematik gösterimi

#### 4.1.1 İçyapı İncelemeleri

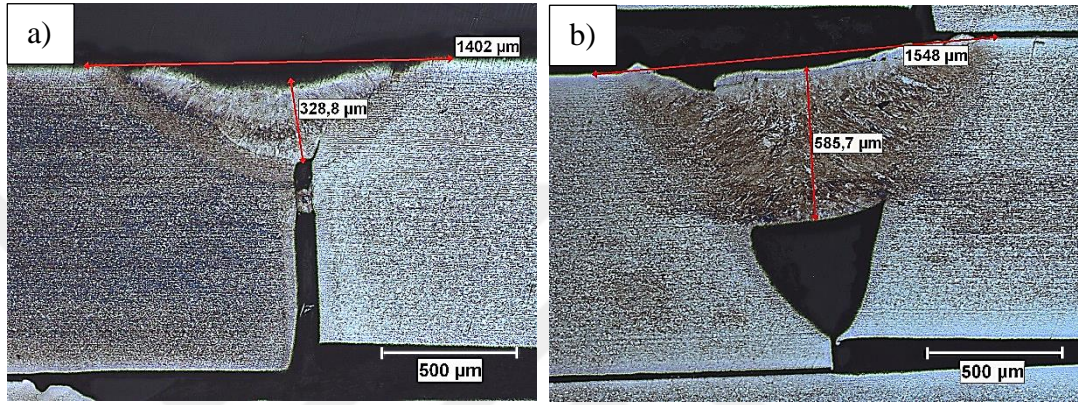
Farklı lazer parametreleri kullanılarak Nd:YAG lazer kaynağı ile DP800-DP800 kombinasyonunda birleştirilen numunelere ait optik mikroskop, SEM ve EBSD deneylerinin sonuçları bu bölümde gösterilmiştir.

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynak işlemleri sırasında darbe süresi, darbe gücü, frekans ve ışın çapı parametreleri değiştirilmiştir. 1,2 mm kalınlığındaki DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.2-Şekil 4.13'te verilmiştir. Seçilen numuneler farklı parametre koşullarında en yüksek ve en düşük ısı girdisi değerlerine sahip numunelerdir. Makro yapı görüntülerinde kaynak derinliği ve kaynak genişliği ölçümleri yapılmıştır. EB ve ITAB'dan yüksek büyütmelelerde örnekler gösterilmiştir.

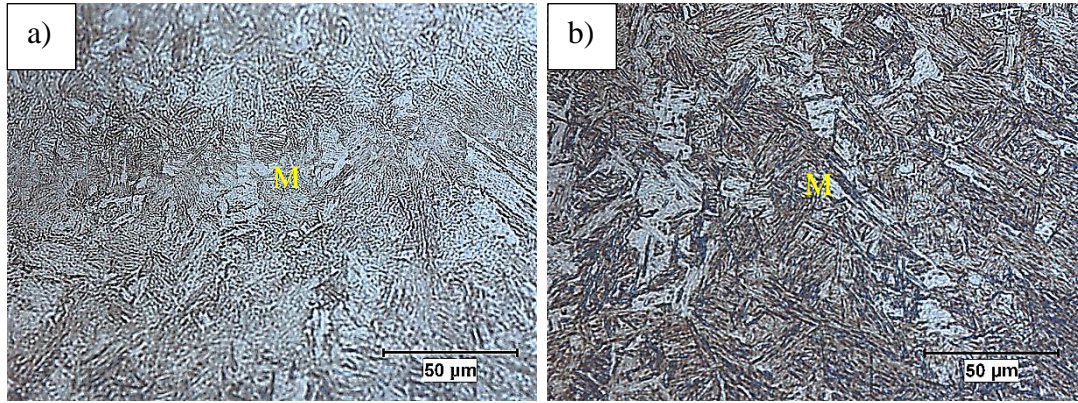
Optik mikroskop incelemelerinde her bir parametre değişiminin diğer parametreler sabit tutularak makro ve mikro yapı özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. İlk olarak farklı darbe süreleri ile (2,4 ms, 2,6 ms ve 2,8 ms) birleştirilen DP800-DP800 numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (2,4 ms-44,8 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (2,8 ms-52,3 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir (Şekil 4.2-Şekil 4.4). 1 ve 3 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğraflarında iki numunede de kaynak derinliğinin parçaları tamamen birleştirebilecek seviyeye (kaynak kökünün birleşmesi) ulaşamadığı görülmüştür (Şekil 4.2). Fakat darbe süresinin daha yüksek olduğu (böylece ısı girdisi de yüksek) 3 kodlu numunenin kaynak derinliği (585,7  $\mu\text{m}$ ) ve kaynak genişliği (1548  $\mu\text{m}$ ) 1 kodlu numunenin kaynak derinliğinden (328,8  $\mu\text{m}$ ) ve kaynak genişliğinden (1402  $\mu\text{m}$ ) daha fazladır. 1 ve 3 kodlu numunelere ait EB mikro yapı fotoğraflarında genel itibariyle martenzitten oluşan içyapılar görülmektedir (Şekil 4.3). Özellikle ısı girdisinin daha yüksek olduğu 3 kodlu numunede görüldüğü kadarıyla 1 kodlu numuneye göre EB'de daha kalın lamelli martenzit oluşumu vardır (Şekil 4.3). Şekil 4.4'te ise 1 ve 3 kodlu numunelere ait ITAB makro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 4.4a ve Şekil 4.4c'de makro yapı fotoğraflarında ITAB bölgelerinin sınırları işaretlenmiş ve genişlikleri ölçülmüştür. 1 kodlu numunenin ITAB genişliği 257  $\mu\text{m}$  iken 3 kodlu



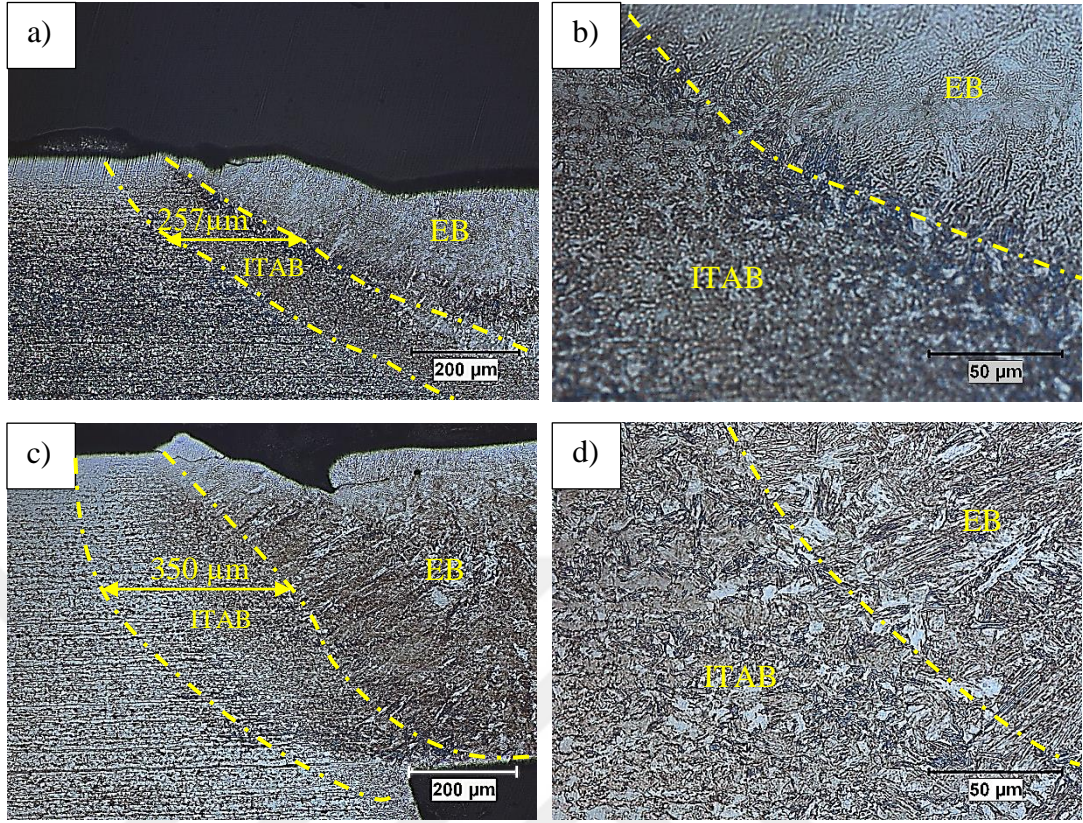
numunenin ITAB genişliği 350  $\mu\text{m}$ 'dir. Isı girdisindeki artışla beraber ITAB genişliği de artmıştır. ITAB  $A_3$  sıcaklığının üzerinden  $A_1$  sıcaklığının altına kadar geniş sıcaklık aralığında değişen bir bölgeyi kapsamakta ve martenzit, temperlenmiş martenzit, beynit, kalıntı ostenit ve ferritten oluşan yapıları içermektedir (Şekil 4.4b-d). Ayrıca ITAB mikro yapı fotoğraflarından görüldüğü üzere 3 kodlu numunenin ITAB'ında 1 kodlu numunenin ITAB'ına göre tane irileşmesi söz konusudur (Şekil 4.4b,d).



**Şekil 4.2.** Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu (2,4 ms-44,8 joule/mm) ve b) 3 kodlu (2,8 ms-52,3 joule/mm) numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntüleri



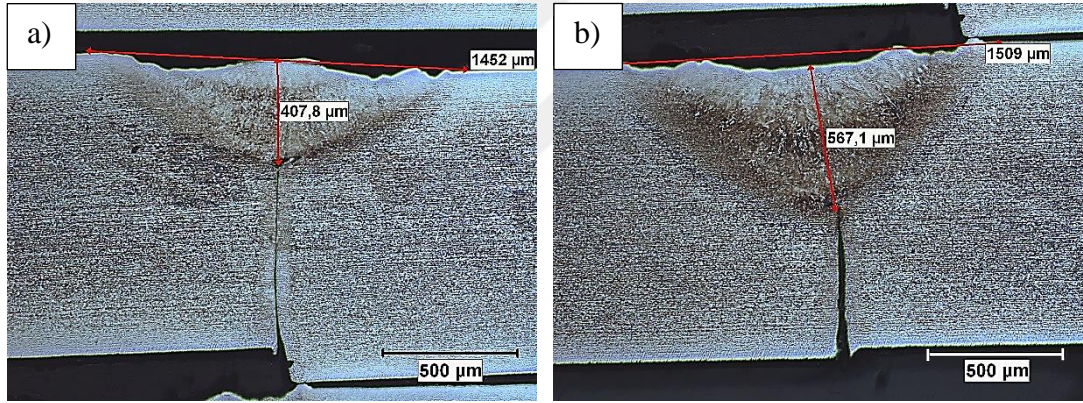
**Şekil 4.3.** Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu (2,4 ms) ve b) 3 kodlu (2,8 ms) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M:Martenzit)



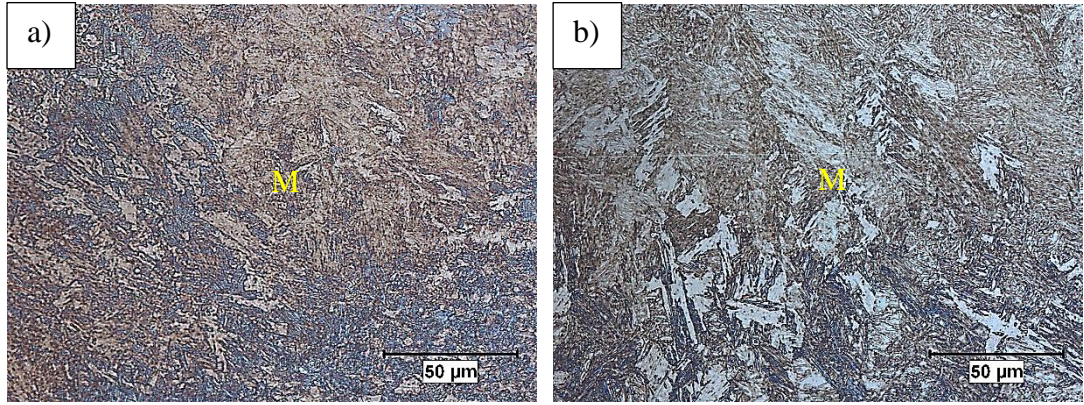
**Şekil 4.4.** Farklı darbe süreleri ile birleştirilen a) 1 kodlu numune (2,4 ms) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (2,8 ms) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numunelere ait ITAB mikro yapı görüntüleri

Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı darbe güçlerinde (6,5 kW, 7 kW ve 7,5 kW) DP800-DP800 kombinasyonunda birleştirilen numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (6,5 kW-45,1 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 5 kodlu numuneye (7,5 kW-52 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.5-Şekil 4.7’de gösterilmiştir. 4 ve 5 kodlu numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntülerinde darbe gücünün ve ısı girdisinin daha yüksek olduğu 5 kodlu numunede kaynak derinliği (567,1  $\mu\text{m}$ ) ve kaynak genişliği (1509  $\mu\text{m}$ ) 4 kodlu numunenin kaynak derinliğinden (407,8  $\mu\text{m}$ ) ve kaynak genişliğinden (1452  $\mu\text{m}$ ) daha fazladır (Şekil 4.5). Darbe gücünün ve ısı girdisinin 5 kodlu numunede 4 kodlu numuneye göre yüksek oluşu kaynak derinliği ve genişliğini arttırmıştır. 4 ve 5 kodlu numunelere ait EB mikro yapı fotoğraflarında iki numunenin de EB’sinde genel itibariyle martenzitten oluşan içyapılar görülmektedir (Şekil 4.6). Darbe gücündeki artış EB’nin

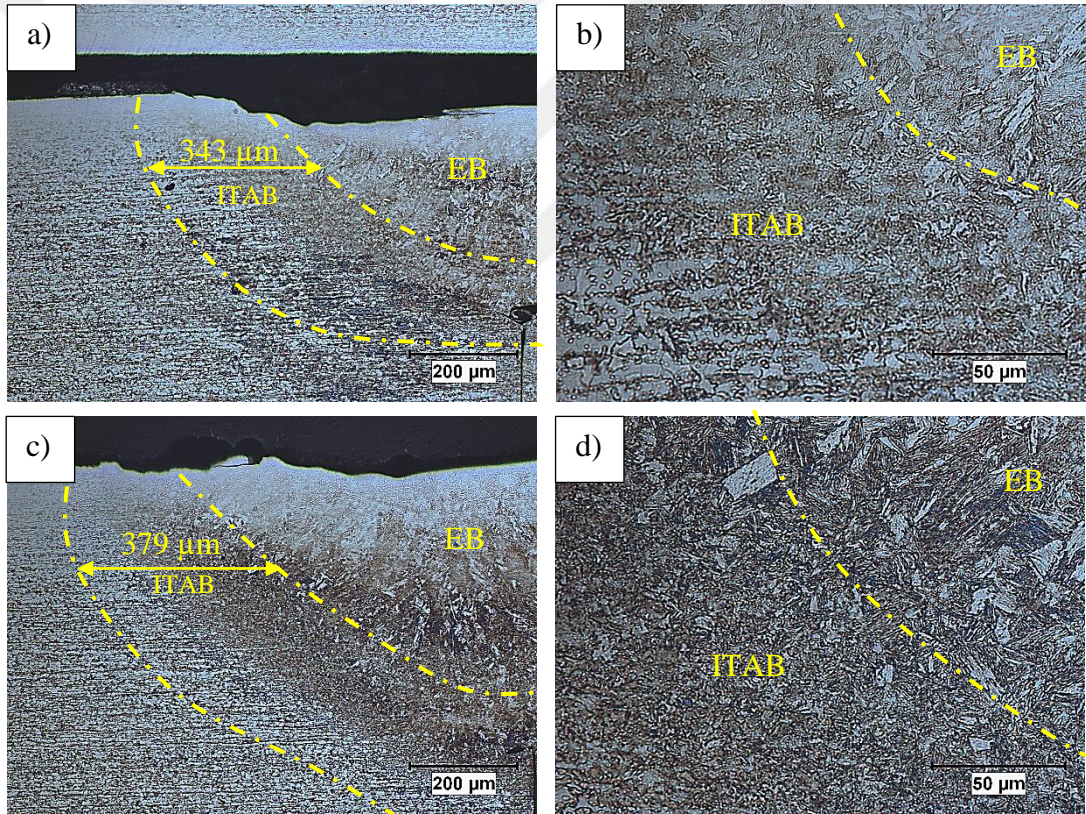
daha yüksek sıcaklıklara daha uzun süre maruz kalmasına neden olduğundan 5 kodlu numunede daha etkin martenzit oluşumuna sebep olmuştur (Şekil 4.6). Şekil 4.7a-d'de 4 ve 5 kodlu numunelerin ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiş ve ITAB genişlikleri ölçülmüştür. 4 kodlu numunenin ITAB genişliği 343  $\mu\text{m}$  iken 5 kodlu numunenin ITAB genişliği 375  $\mu\text{m}$ 'dir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.7 karşılaştırıldığında darbe süresindeki değişimin ITAB genişliği üzerine olan etkisinin darbe gücüne göre daha fazla olduğu söylenebilir. Şekil 4.7b ve Şekil 4.7d'de 4 ve 5 kodlu numunelerin EB ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. İki numunenin de ITAB bölgelerinde martenzit, temperlenmiş martenzit, beynit, kalıntı ostenit ve ferrit fazları mevcuttur. 5 kodlu numune ITAB'ında 4 kodlu numune ITAB'a göre ısı girdisinin daha fazla olmasından dolayı daha yoğun temperlenmiş martenzit, beynit ve kalıntı östenit oluşumunun gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.7).



**Şekil 4.5.** Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu (6,5kW-45,1 joule/mm) ve b) 5 kodlu (7,5 kW-52 joule/mm) numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntüleri

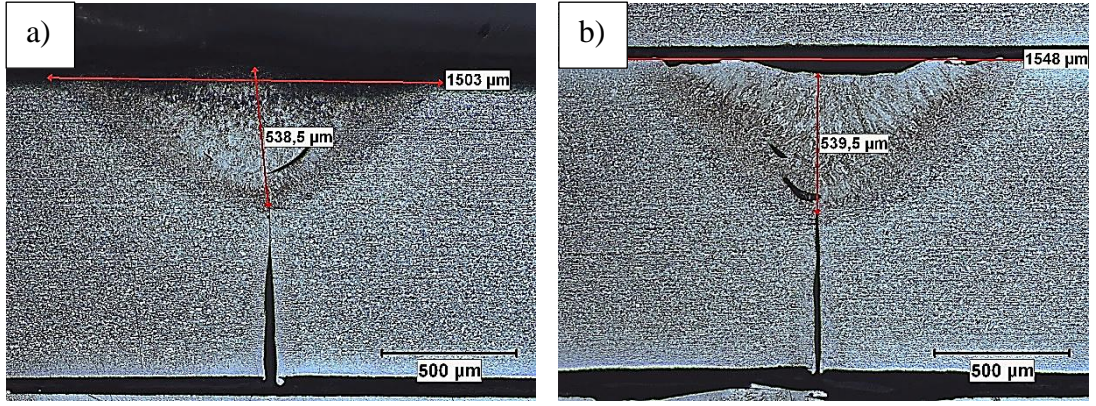


**Şekil 4.6.** Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu (6,5kW) ve b) 5 kodlu (7,5kW) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)

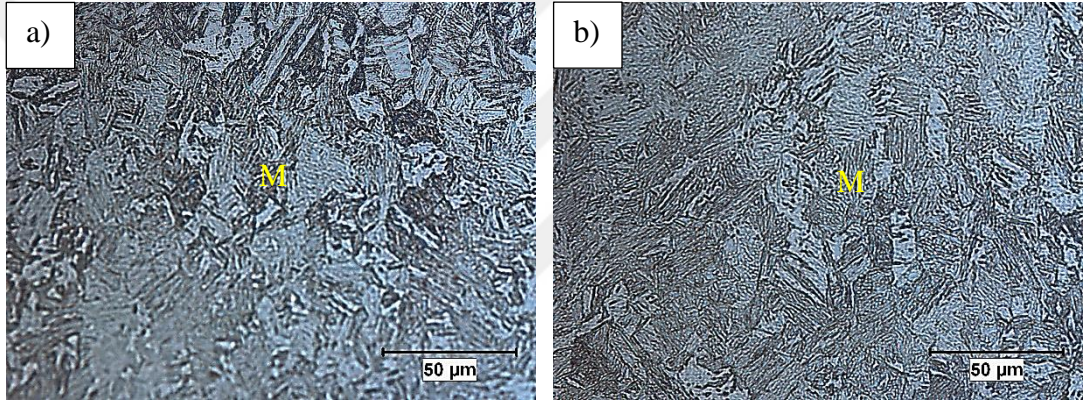


**Şekil 4.7.** Farklı darbe güçleri ile birleştirilen a) 4 kodlu numune (6,5kW) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 5 kodlu numune (7,5kW) ITAB makro yapı ve d) 5 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

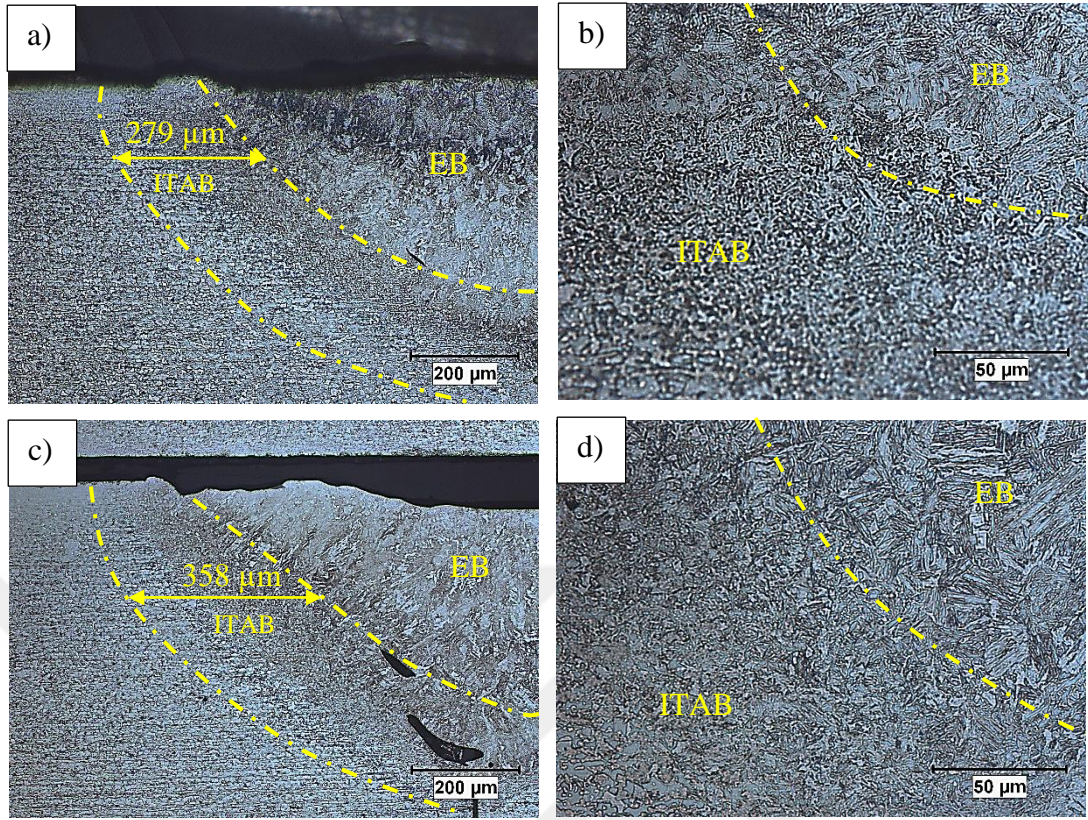
Farklı frekanslarda (7,5 Hz, 8 Hz ve 8,5 Hz) birleştirilen DP800-DP800 numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numune (7,5 Hz-45,5 J/mm) ile en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numuneye (8,5 Hz-51,6 J/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.8-Şekil 4.10 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b’de sırasıyla 6 ve 7 kodlu numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı görüntüleri gösterilmiştir. Isı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunenin kaynak derinliği 539,5 µm ve kaynak genişliği 1548 µm’dir. 6 kodlu numunenin ise kaynak derinliği 538,5 µm ve kaynak genişliği 1503 µm’dir. Frekansın ve ısı girdisinin fazla olması 7 kodlu numunede 6 kodlu numuneye göre kaynak genişliği ve kaynak derinliğinde çok fazla bir fark yaratmamıştır. Şekil 4.9’da 6 ve 7 kodlu numunelere ait EB mikro yapı fotoğrafları incelendiğinde iki numunede de EB genel itibariyle martenzitten oluşmaktadır. Frekansın yüksek olduğu 7 kodlu numunede ise 6 kodlu numuneye göre daha etkin martenzit oluşumu görülmektedir (Şekil 4.9). Ayrıca frekanstaki artış 7 kodlu numunede 6 kodlu numuneye göre EB’de daha ince lamelli martenzit oluşumuna da neden olmuştur. Şekil 4.10a-d’de ise 6 ve 7 kodlu numunelere ait ITAB makro ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 4.10a ve Şekil 4.10c’de ITAB sınırları işaretlenmiş ve genişlikleri ölçülmüştür. 6 kodlu numunenin ITAB genişliği 279 µm iken ısı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunenin ITAB genişliği 358 µm’dir. Frekanstaki ve darbe süresindeki değişimin ITAB genişliği üzerine etkileri kıyaslandığında benzer oranlarda etki yaptığı söylenebilir. Şekil 4.10b ve Şekil 4.10d 6 ve 7 kodlu numunelerin EB ve ITAB mikro yapılarının kesişimini içermektedir. ITAB’da martenzit, ferrit, temperlenmiş martenzit, kalıntı ostenit ve beynit fazları bulunmaktadır. Frekanstaki artışla beraber ITAB’da tane irileşmesi de görülmektedir (Şekil 4.10b,d).



**Şekil 4.8.** Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu (7,5 Hz-45,5 joule/mm) ve b) 7 kodlu (8,5 Hz-51,6 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri



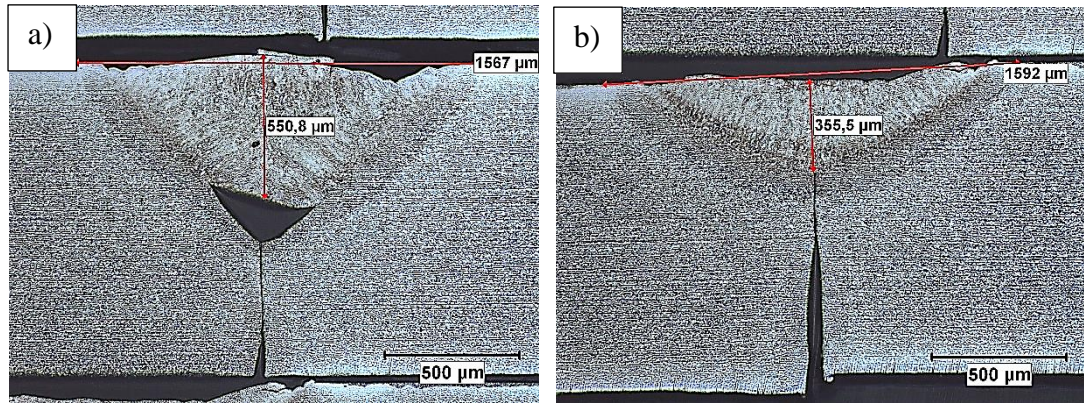
**Şekil 4.9.** Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu (7,5 Hz) ve b) 7 kodlu (8,5 Hz) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



**Şekil 4.10.** Farklı frekanslar ile birleştirilen a) 6 kodlu numune (7,5 Hz) ITAB makro yapı, b) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 7 kodlu numune (8,5 Hz) ITAB makro yapı ve d) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

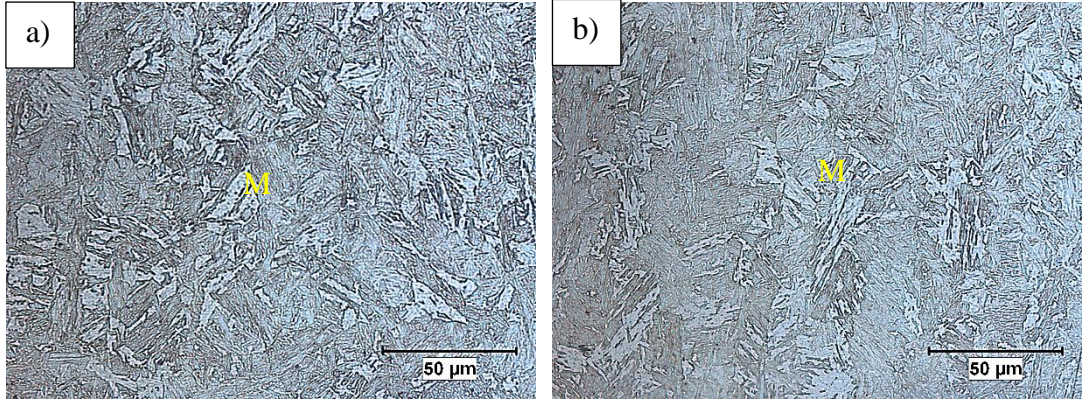
Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı ışın çaplarında (1 mm, 1,1 mm ve 1,2 mm) ve eşit ısı girdisinde (48,5 joule/mm) DP800-DP800 kombinasyonunda birleştirilen numunelerden en düşük ışın çapına sahip 8 kodlu numune (1 mm) ve en yüksek ışın çapına sahip 9 kodlu numuneye (1,2 mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.11-Şekil 4.13'te gösterilmiştir. 8 ve 9 kodlu numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı fotoğraflarında ışın çapının daha düşük olduğu 8 kodlu numunede kaynak derinliği (550,8 μm) 9 kodlu numunenin kaynak derinliğinden (355,5 μm) daha fazladır (Şekil 4.11). Isı girdileri eşit olmasına rağmen ışın çapının daha düşük olmasından dolayı birim alana daha yoğun uygulanan enerji 8 kodlu numunede 9 kodlu numuneye göre daha fazla kaynak derinliği elde edilmesine neden olmuştur. Fakat ışın çapının daha düşük olduğu 8 kodlu numunenin kaynak genişliği (1567 μm) 9 kodlu numunenin kaynak genişliğinden (1592 μm) daha azdır. 9 kodlu numunede ışın çapının 8 kodlu numuneden büyük olması kaynak genişliğinin de 8 kodlu numuneye göre az da

olsa büyük olmasına neden olmuştur. Şekil 4.12’de 8 ve 9 kodlu numunelere ait EB mikro yapı fotoğraflarında her iki numunenin de EB’inde genel itibariye martenzitten oluşan içyapılar görülmektedir. İki numunenin ısı girdisi eşit olsa da 9 kodlu numunede 8 kodlu numuneye göre ışın çapındaki artış birim kesitteki enerji girdisini düşürmüş ve EB’de daha ince lamelli martenzit oluşumuna neden olmuştur. Şekil 4.13’te ise 8 ve 9 kodlu numunelerin makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiş, ITAB bölgeleri işaretlenmiş ve genişlikleri ölçülmüştür. 8 kodlu numunenin ITAB genişliği 337  $\mu\text{m}$  iken 9 kodlu numunenin ITAB genişliği 386  $\mu\text{m}$ ’dir. Işın çapındaki artış kaynak genişliğinde olduğu gibi ITAB genişliğinin de 9 kodlu numunede 8 kodlu numuneden yüksek olmasına neden olmuştur. Şekil 4.13b ve Şekil 4.13d’de 8 kodlu ve 9 kodlu numunelerin EB ve ITAB kesişim bölgeleri gösterilmiştir. ITAB martenzit, ferrit, temperlenmiş martenzit, kalıntı ostenit ve beynit fazlarından oluşmaktadır. Işın çapındaki artış ITAB’da daha iri taneli bir içyapı oluşumuna neden olmuştur (Şekil 4.13b,d). Xue ve ark. (2017) çalışmalarında 1 mm kalınlığında DP1000 sacları Nd:YAG lazer kaynağı ile alın altına birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında darbe süresi ve frekans artışı ile kaynak penetrasyon derinliği artarken, ışın çapındaki artışla kaynak penetrasyon derinliği düşmüştür. Ayrıca lazer ışın gücü de arttırıldığında kaynak penetrasyon derinliği artmaktadır. Benzer sonuçlara (kaynak parametrelerinin etkileri bakımından) bu tez kapsamında yapılan kaynak bölgesi ölçümlerinde de ulaşılmıştır.

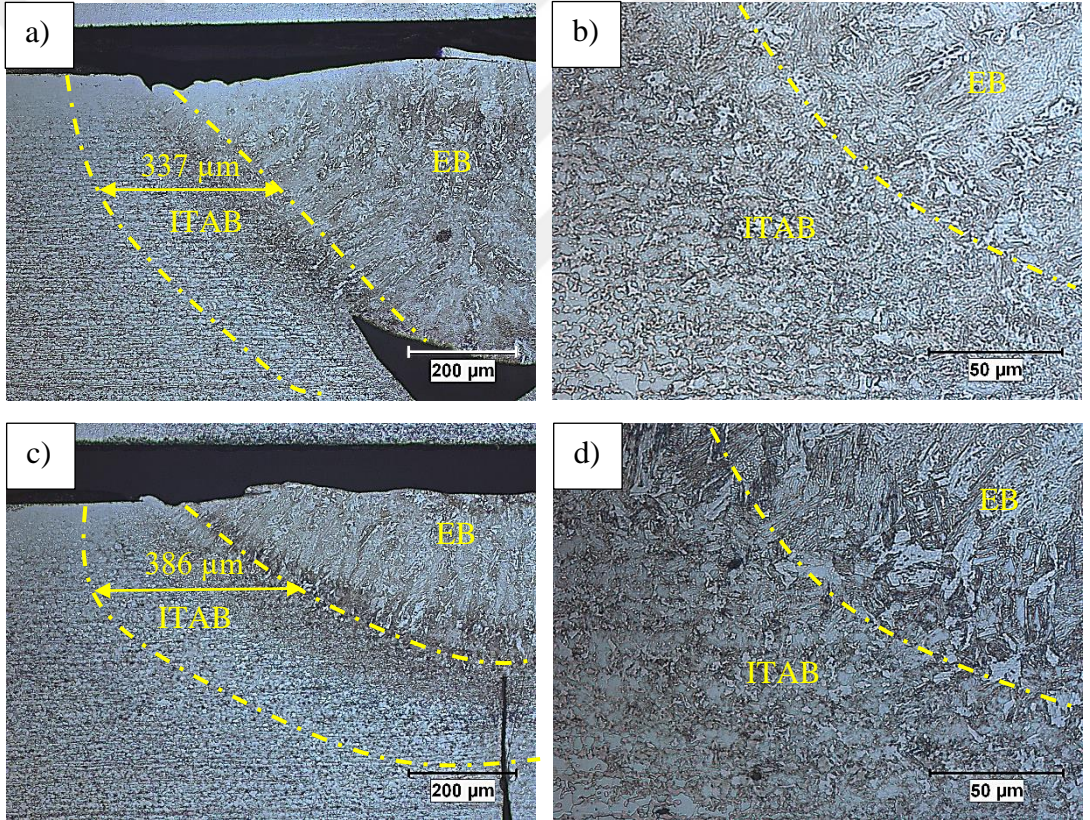


**Şekil 4.11.** Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu (1 mm-48,5 joule/mm) ve b) 9 kodlu (1,2 mm-48,5 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri





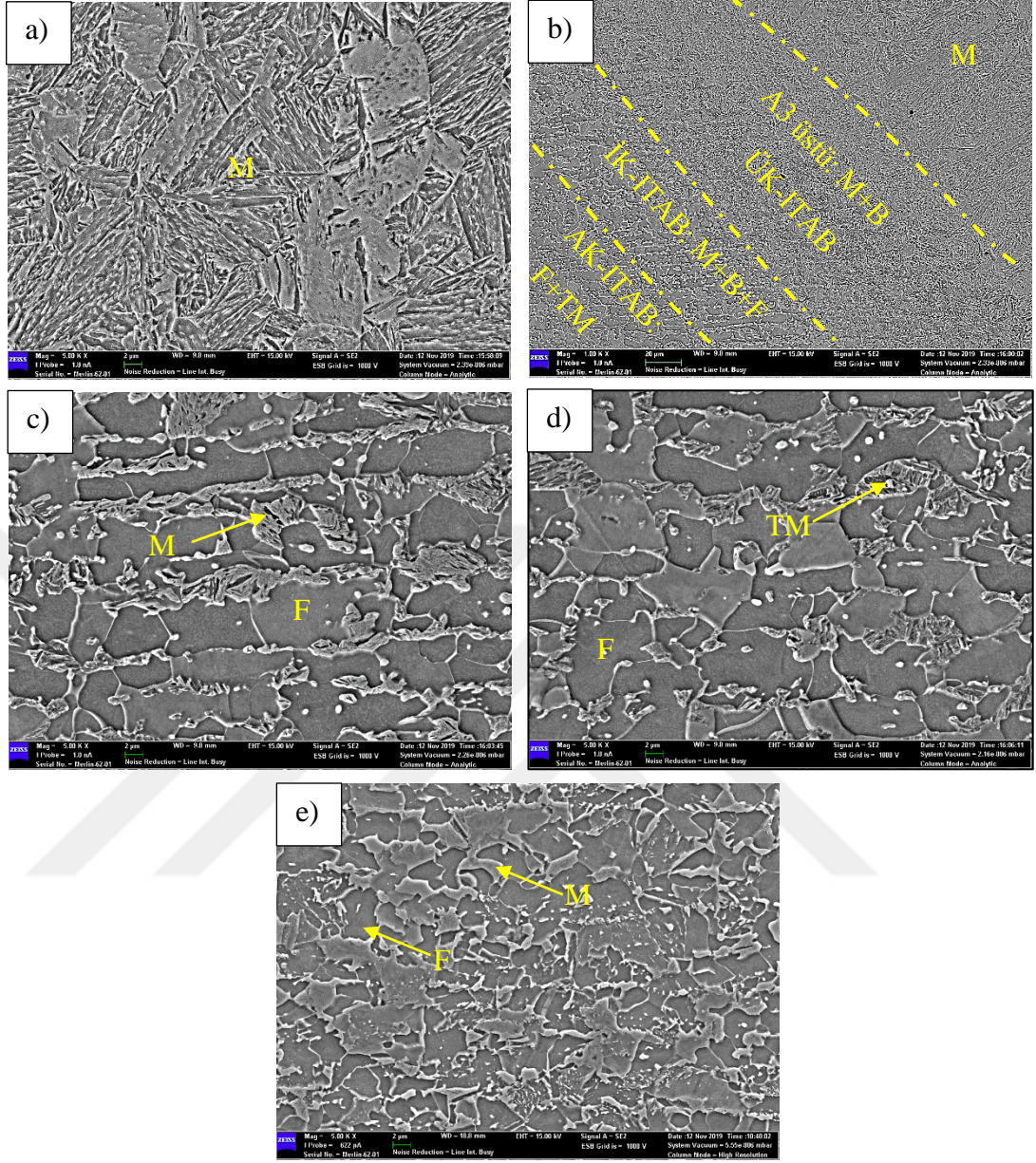
**Şekil 4.12.** Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu (1 mm) ve b) 9 kodlu (1,2 mm) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



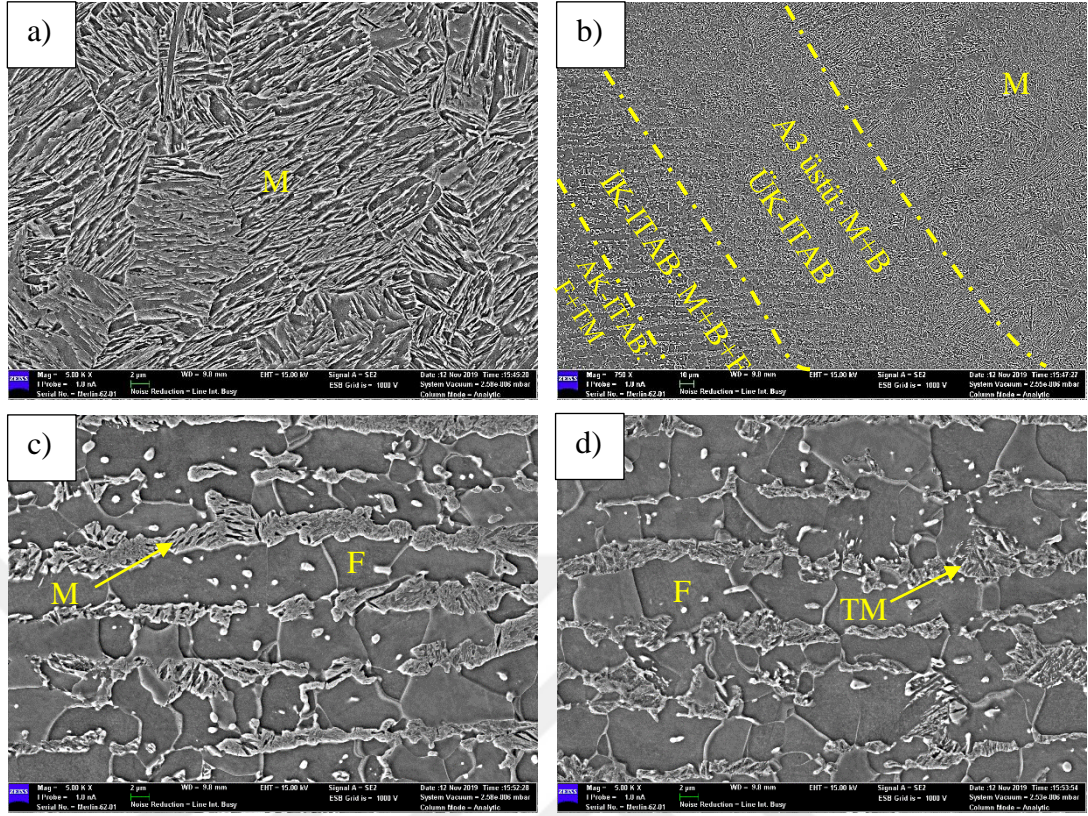
**Şekil 4.13.** Farklı ışın çapları ile birleştirilen a) 8 kodlu numune (1 mm) ITAB makro yapı, b) 8 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (1,2 mm) ITAB makro yapı ve d) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynağı ile dokuz farklı parametrede birleştirilen numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (44,8 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (52,3 joule/mm) ait Şekil 4.4a ve Şekil 4.4c'de işaretlenen EB, ITAB ve BM bölgelerinin SEM fotoğrafları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilmiştir. Çift fazlı DP800 çeliğinin karakteristik içyapısını oluşturan ferrit ve martenzit fazlarından oluşan BM içyapı görüntüsü Şekil 4.14e'de gösterilmiştir. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB'sinde genel itibariyle martenzitten oluşan içyapılar olsa da ısı girdisinin daha yüksek olduğu 3 kodlu numunede 1 kodlu numuneye göre daha kalın lamelli martenzit oluşumu görülmektedir (Şekil 4.14a, Şekil 4.15a). EB'den BM sınırına kadar olan ve ITAB'ı da içeren bölge 1 kodlu ve 3 kodlu numuneler için sırasıyla Şekil 4.14b ve Şekil 4.15b'de gösterilmektedir. Bu bölge üst kritik ITAB (ÜK-ITAB) olarak adlandırılmaktadır. Bu görüntüler nispeten yüksek büyütme (1000X ve 750X) çekilse de Nd:YAG lazer kaynağında çok dar bir ITAB oluşumu söz konusu olduğundan EB'den BM'ye kadar olan içyapı değişimleri görülebilmektedir. EB'ye yakın ITAB'da sıcaklığın  $A_3$  üzerine çıkmasından dolayı genel itibariyle martenzitten oluşan fakat BM yönünde gidildikçe içyapıdaki beynitte artışın olduğu bir içyapı vardır. Ayrıca bu bölgede yeniden kristalleme ile birlikte ince taneli bir içyapı oluşmuştur (Şekil 4.14b, Şekil 4.15b). Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunenin sertlik düşüş ve yumuşama bölgeleri olan  $A_1$ - $A_3$  sıcaklıkları arasındaki inter kritik ITAB (İK-ITAB) ve  $A_1$  sıcaklığının altındaki alt kritik ITAB'ları (AK-ITAB) sırasıyla Şekil 4.14c ve Şekil 4.14d'de gösterilmektedir. 1 kodlu numunede İK-ITAB martenzit, beynit, temperlenmiş martenzit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır (Şekil 4.14c). Bu bölgede kaynak sırasında ani ısınma ile BM yapısındaki martenzitlerin ostenite dönüşmesi ve çok hızlı ısıtmadan dolayı ostenite dönüşemeyen martenzitin temperlenmesi söz konusudur. İK-ITAB'da BM yönünde sıcaklığın düşmesinden dolayı martenzit oranında düşüş ve temperlenmiş martenzin oranında artış olmaktadır. Ayrıca bu bölgedeki ferrit oranı BM'ye doğru gidildikçe artış gösterse de oranında çok fazla bir değişiklik yoktur. AK-ITAB'da ise  $A_1$  sıcaklığının altında kaldığından dolayı sadece BM yapısında bulunan martenzin temperlenmesi gerçekleşmektedir. Ayrıca içyapıda bulunan poligonal ferritte sıcaklık artışıyla beraber tane irileşmesi söz konusu olmuştur (Şekil 4.14d). Dong ve ark. (2016) çalışmalarında 700 W gücünde Nd:YAG lazer kaynak cihazı ile 1,4 mm kalınlığındaki DP780 ve DP980 sacları alın altına birleştirmişlerdir. AK-ITAB'da BM'deki martenzitin

bozunarak görünür karbürlere dönüştüğünü SEM ile çok yüksek büyütmelemlerde tespit etmişlerdir. Çökelen karbürlerin  $Fe_3C$  tam kesrinde sementitler olduğu ve temperlenmiş martenzitte gözlenebileceği belirtilmiştir. Isı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede ise İK-ITAB ve AK-ITAB fotoğrafları sırasıyla Şekil 4.15c ve Şekil 4.15d'de gösterilmiştir. Özellikle 3 kodlu numunenin AK-ITAB'ı ile 1 kodlu numunenin AK-ITAB görüntüsü kıyaslandığında ısı girdisinin daha yüksek olduğu 3 kodlu numunede martenzitin daha fazla ısı girdisine maruz kalmasından dolayı daha fazla bozunarak temperlenmiş martenzite daha yüksek oranda dönüştüğü görülmüştür(Şekil 4.14d,Şekil 4.15d). 3 kodlu numunenin İK-ITAB ve AK-ITAB SEM görüntüleri 1 kodlu numunenin İK-ITAB ve AK-ITAB SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında sıcaklığın yüksek olduğu 3 kodlu numunede daha iri taneli ferritler de net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15).



**Şekil 4.14.** Isı girdisinin en düşük olduğu 1 kodlu numunede (44,8 joule/mm) a) EB, b) ITAB genel, c) İK-ITAB d) AK-ITAB ve e) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, B: Beynit ve F: Ferrit)



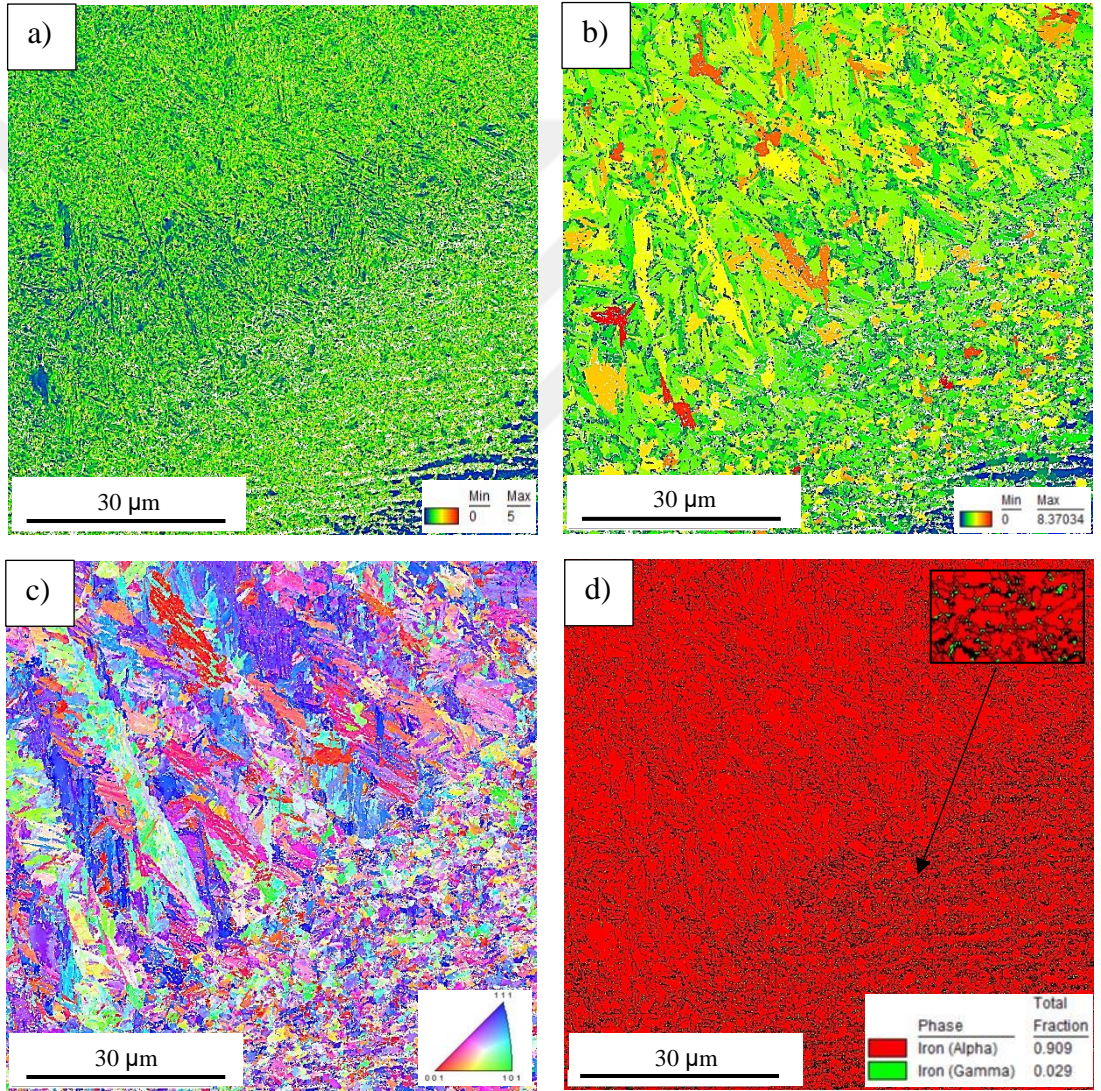
**Şekil 4.15.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numunede (52,3 joule/mm) a) EB, b) ITAB genel, c) İK-ITAB ve d) AK-ITAB SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, B: Beynit ve F:Ferrit)

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelere EBSD analizleri özellikle kaynak bölgesinden BM'ye geçişin daha detaylı incelenmesi ve nicel olarak açıklanabilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda SEM analizlerinde olduğu gibi en düşük ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (44,8 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (52,3 joule/mm) seçilerek geçiş bölgeleri EBSD deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 1 ve 3 kodlu numunelere ait çekirdek içi ortalama yönelim farkı (Kernel Average Misorientation (KAM)) haritası, tane yönelim yayılımı (Grain Orientation Spread (GOS)) haritası, ters kutup şekli (Inverse Pole Figure (IPF)) haritası ve faz haritaları Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

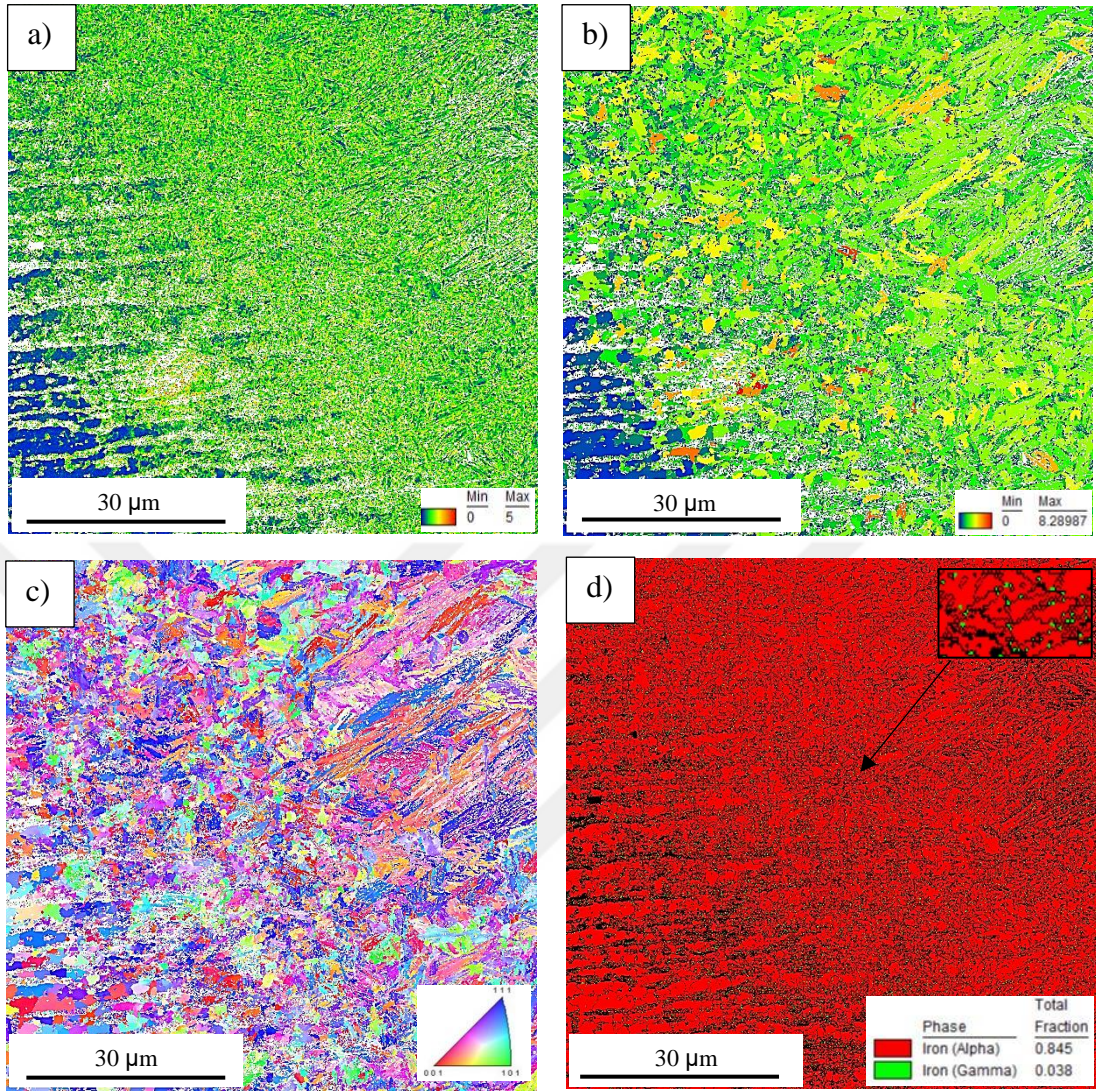
KAM yönteminde tane içerisindeki herhangi bir nokta ve bu noktaya komşu bölgelerin açısız yönelim farkları ölçülmektedir (Radwanski 2015). Şekil 4.16a ve Şekil 4.17a'da gösterildiği gibi  $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$  arasındaki yönelim farkı değerleri için KAM haritaları

oluşturulmuştur. Düşük KAM değerlerinde mavi renk yoğunlukta iken KAM değeri yükseldikçe renk sırasıyla yeşil, sarı ve kırmızıya dönüşmektedir. KAM değeri dislokasyon yoğunluğundan da etkilenmektedir. Deformasyon oranı arttıkça ya da ferrite göre yönelim farkı yüksek olan martenzit oranı arttıkça KAM değeri yükselmektedir (Aktarer 2019). Bu yüzden Şekil 4.16a ve Şekil 4.17a'da mavi ağırlıklı bölgeler ferrit içyapısına sahipken yeşil ağırlıklı bölgeler martenzit ve beynit ağırlıklı denilebilir. Genel olarak 1°-5° arasındaki KAM değerleri yüksek dislokasyon yoğunluğundan dolayı deforme olmuş taneleri ve sert fazları, 1°'nin altındaki KAM değerleri ise yeniden kristallenmiş taneleri göstermektedir (Bozzolo ve ark. 2012, Lin ve ark. 2014). KAM yöntemine benzer şekilde yönelim farkları GOS yöntemiyle de verilebilmektedir. GOS yönteminin KAM'dan farkı ise tanelerin ortalama yönelimini göstermesidir (Mandal ve ark. 2008). GOS yöntemi kullanılarak yaklaşık olarak 0°-8,3° arasındaki değerler için GOS haritaları çıkarılmıştır (Şekil 4.16b ve Şekil 4.17b). GOS yönteminde dinamik olarak yeniden kristallen taneler deforme olmuş tanelere göre daha düşük yönelim yayılımına sahiptir. 1,5°'nin altındaki GOS değerleri yeniden kristallen kısım olarak değerlendirilmektedir (Barbier ve ark. 2015). GOS görüntülerinde KAM görüntüsüne benzer şekilde mavi bölge ferrit ağırlıklı iken sarı ve yeşil bölgeler genel itibariyle martenzit ve ferrit ağırlıklıdır (Şekil 4.16b ve Şekil 4.17b). Geçiş bölgesindeki kristalografik yönelmeyi belirlemek için ise IPF haritaları kullanılmıştır (Şekil 4.16c ve Şekil 4.17c). IPF-ND haritası (111) düzlem normalinin, et kalınlığı yönüne paralel olduğu kristalografik yönelime sahip taneleri mavi olarak göstermektedir. Şekil 4.16c ve Şekil 4.17c'de mavi renkli tanelerin ağırlığı, bu yönelime sahip tanelerin ağırlıkta olduğunu göstermektedir. Söz konusu kristalografik yönelim, yeniden kristallenmiş normalize edilmiş çeliklerde gözlemlenmektedir. DP çeliklerinde normalizasyondan dolayı çoğunlukla mavi renk yoğunluktadır. Son olarak faz haritalarında ise kırmızı bölge genel itibariyle ferrit ve martenzitten oluşurken kalıntı östenit yapıları yeşil renkli olarak gösterilmektedir (Şekil 4.16d ve Şekil 4.17d). Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %2,9 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %3,8 olarak tespit edilmiştir. Isı girdisinin fazla olması İK-ITAB genişliğini arttırmış ve bu sebeple de kalıntı östenit miktarında artış gerçekleşmiştir. Isı girdisi arttıkça İK-ITAB bölgesinde daha yüksek sıcaklıklara çıkılmaktadır. Yüksek sıcaklıktayken bölgenin daha yüksek oranı ostenit olmakta ve

yapıdaki karbon da ostenitin içinde çözünmektedir. İçinde az karbon çözünen ostenit tamamen martenzite dönüşürken; yüksek miktarda karbon içeren ostenit daha stabil olmaktadır. Ostenitin daha stabil olması martenzit bitiş sıcaklığını da oda sıcaklığının altına ötelemektedir. Oda sıcaklığında soğutma yapıldığı zaman ise bu ostenit kısmen martenzite dönüşmekte ve dönüşmeyen kısım “kalıntı ostenit” olarak yapıda kalmaktadır. Bu mekanizma ısı girdisi yüksek numunelerde kalıntı ostenit miktarının ısı girdisinin daha düşük olduğu numuneden yüksek çıkmasının sebebidir.



**Şekil 4.16.** Isı girdisinin en düşük olduğu 1 kodlu numuneye (44,8 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF-ND haritası ve d) Faz haritası

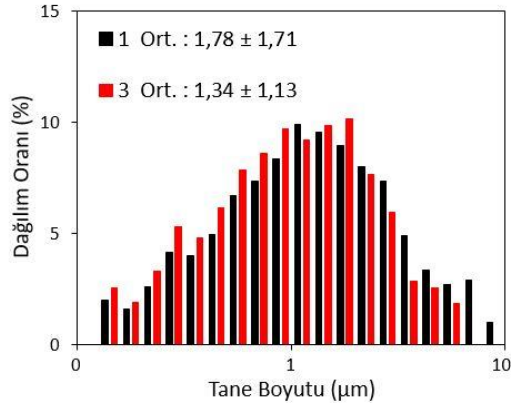


**Şekil 4.17.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numuneye (52,3 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası

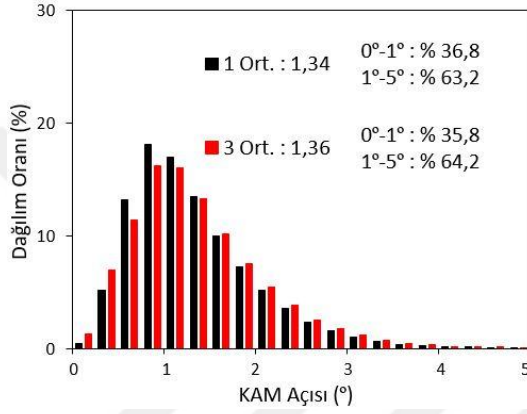
EBSD verilerinden elde edilen ve Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de haritalar yardımıyla gösterilen 1 ve 3 kodlu numunelerin geçiş bölgelerine ait tane boyutu dağılımı, KAM açısı dağılımı ve GOS açısı dağılım grafikleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunede ortalama tane boyutu 0,14 µm ila 8,91 µm arasında değişmekte olup ortalama tane boyutu 1,78 µm’dir (Şekil 4.18a). Isı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede ise ortalama tane boyutu 0,14 µm ila 5,62 µm arasında değişmekte olup ortalama tane boyutu 1,13 µm’dir (Şekil 4.18a). Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numune ısı girdisinin yüksek 3 kodlu numuneden taralı alanda daha büyük



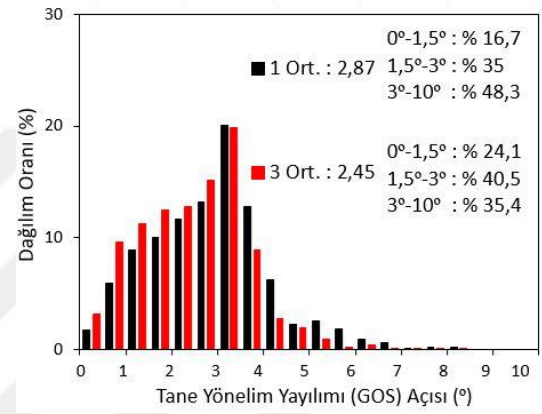
tane boyutuna sahiptir. KAM açısı değerleri lokal deformasyonların ve ikinci sert fazların tespitinde yardımcı olmaktadır. KAM açısı değerleri 0°-5° arasında değişmekte olup 0°-1° ve 1°-5° arasındaki yüzdeler oranlar ile ortalama KAM değerleri verilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunenin ortalama KAM değeri 1,34 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunenin ortalama KAM değeri 1,36'dır (Şekil 4.18b). Ortalama KAM değerleri arasında önemli bir fark elde edilememiştir. Ayrıca 1 kodlu numunede 0°-1° arasında değişen KAM açısı oranı %36,8 ve 1°-5° arasında değişen KAM açısı oranı %63,2'dir. 3 kodlu numunede ise 0°-1° ve 1°-5° arasında değişen KAM açısı oranları %35,8 ve %64,2'dir. KAM açısı oranlarının dağılımı da benzer sonuçlar göstermektedir. 1 ve 3 kodlu numunelerin GOS açısı ortalama değerleri ise sırasıyla 2,87 ve 2,45'tir (Şekil 4.18c). GOS açısının 0°-1,5°, 1,5°-3° ve 3°-10° arasındaki dağılım oranları da verilmektedir. Isı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede 0°-1,5° GOS açısı %24,1 oranına sahipken ısı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunede GOS açısı %16,7 oranına sahiptir. Bu da 3 kodlu numunenin taralı alanında ferrit oranının 1 kodlu numuneden yüksek olduğuna bir işarettir. Ayrıca yeniden kristallenmenin de 3 kodlu numunede 1 kodlu numuneden fazla gerçekleştiğini göstermektedir. 3 kodlu numunede tane boyutu 1 kodlu numuneden düşük çıkmıştı. Yeniden kristallenmenin 3 kodlu numunede fazla olması tane boyutunun da küçük çıkmasının sebebidir.



a)



b)



c)

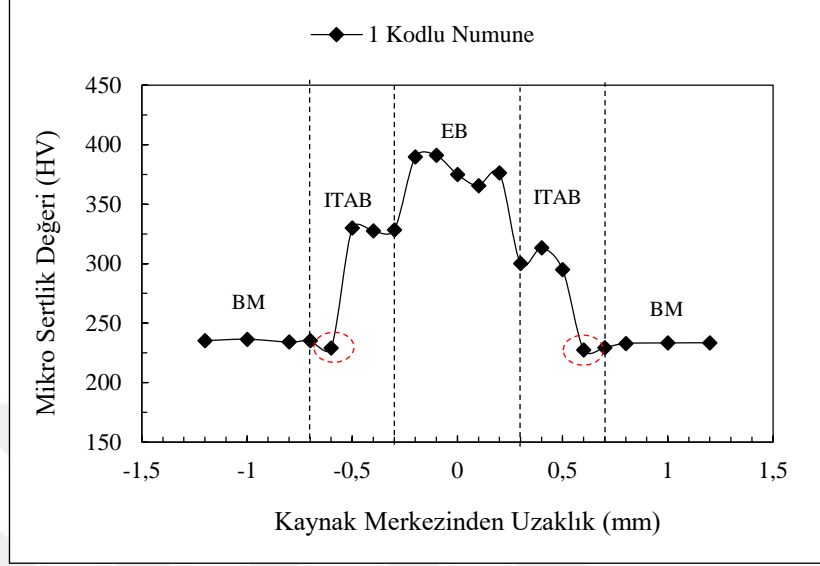
**Şekil 4.18.** 1 kodlu (44,8 joule/mm) ve 3 kodlu (52,3 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı

#### 4.1.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

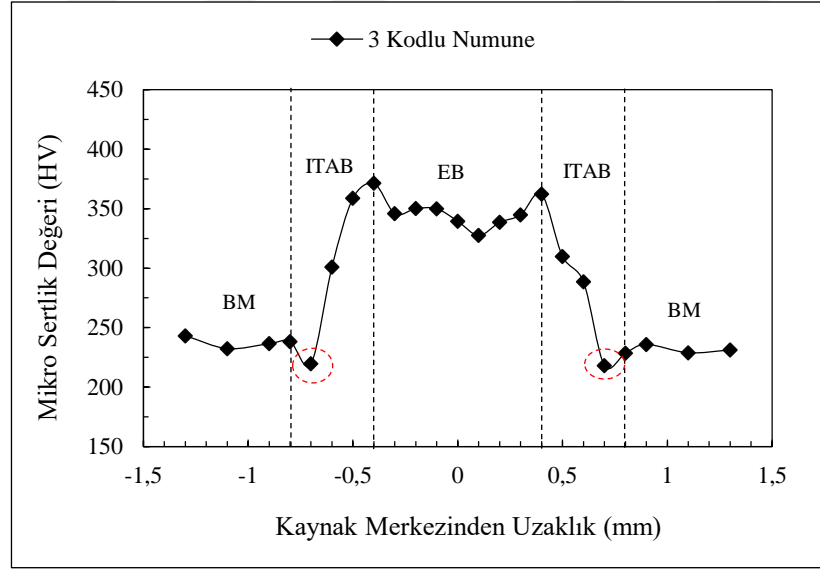
Bu bölümde Nd:YAG lazer kaynağı ile DP800-DP800 kombinasyonunda birleştirilen numunelerde kaynak derinliğinin ortasından geçen yatay bir hat boyunca 0,1 mm aralıklarla ölçülen mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır. Farklı kaynak bölgelerinin sınırları (EB, ITAB ve BM) sertlik grafikleri üzerinde belirlenirken sertlik izi bırakılan makro yapı fotoğrafları da yol gösterici olmuştur.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı darbe sürelerinde (2,4 ms, 2,6 ms ve 2,8 ms) birleştirilen 1, 2 ve 3 kodlu numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (2,4 ms-44,8 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (2,8 ms-52,3 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. 1 kodlu numunenin EB genişliği 0,6 mm iken 3 kodlu numunenin EB genişliği 0,8 mm'dir. Darbe süresi ve ısı girdisindeki artış EB genişliğinin artmasına neden olmuştur. 1 kodlu numunenin EB'sinde ortalama 380 HV<sub>0,2</sub> ve 3 kodlu numunenin EB'sinde ortalama 342 HV<sub>0,2</sub> sertlik değeri ölçülmüştür. Her iki numunede de EB'de BM sertliğinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) oldukça yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 kodlu numunenin EB'sinde ısı girdisindeki artış soğuma hızını düşürmüş ve daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB SEM görüntüleri karşılaştırıldığında ısı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede daha yavaş soğumadan kaynaklı 1 kodlu numuneye göre daha kalın lamelli martenzit oluşumu görülmüştü (Şekil 4.14a ve Şekil 4.15a). 1 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (227,5) HV<sub>0,2</sub> ve 3 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (218 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. En düşük sertliklerin elde edildiği bu kısım AK-ITAB içerisinde kalmaktadır. 1 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %3,19 iken 3 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %7,23 düşmüştür. Yumuşama bölgesi olarak tarif edilen bölge sertlik değerinin BM'nin altında kaldığı bölge ve belirtilen değerler bu bölgede ölçülen en düşük değerlerdir. Isı girdisindeki artış DP çeliğinin BM'sinde bulunan martenzitin daha yüksek oranda temperlenmesine ve martenzitin bozunmasına neden olmuştur. Ayrıca içyapıdaki poligonal ferrit oluşumu da ısı girdisiyle beraber artmaktadır. ITAB genişlikleri 1 kodlu

numune ve 3 kodlu numunede 0,4 mm civarındır. Ayrıca 3 kodlu numunenin ITAB'ında 1 kodlu numunenin ITAB'ına göre daha keskin bir sertlik düşüşü görülmektedir.

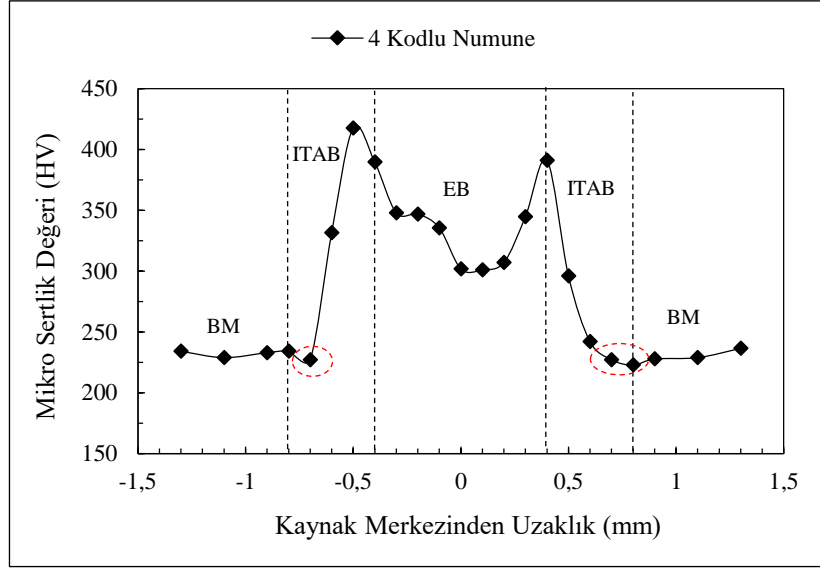


**Şekil 4.19.** 1 kodlu numune (Darbe süresi: 2,4 ms-44,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

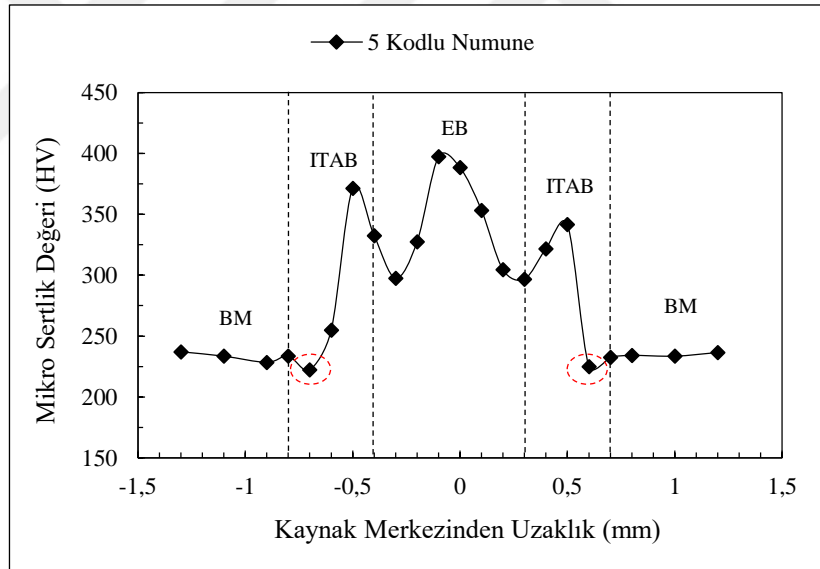


**Şekil 4.20.** 3 kodlu numune (Darbe süresi: 2,8 ms-52,3 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı darbe güçlerinde (6,5 kW, 7 kW ve 7,5 kW) birleştirilen 4, 2 ve 5 kodlu numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (6,5 kW-45,1 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 5 kodlu numuneye (7,5 kW-52 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. 4 kodlu numunenin EB genişliği 0,8 mm iken 5 kodlu numunenin EB genişliği 0,7 mm’dir. Darbe gücünün artması EB genişliğini azaltmıştır. 4 ve 5 kodlu numunelerin makro yapı görüntüleri incelendiğinde darbe gücünün kaynak penetrasyon derinliğini önemli ölçüde arttırdığı kaynak genişliğine ise o derecede etki etmediği görülmektedir (Şekil 4.5). Sertlik ölçümleri de kaynak penetrasyon derinliğinin ortasından alındığı için 5 kodlu numunede EB genişliği az da olsa daha dar çıkmıştır. 4 kodlu numunenin EB’sinde ortalama 326 HV<sub>0,2</sub> ve 5 kodlu numunenin EB’sinde ise ortalama 345 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değeri ölçülmüştür. Darbe gücündeki artışla beraber ısı girdisindeki artış EB’de daha etkin martenzit oluşumuna neden olmuş ve EB’de sertlik değerlerini arttırmıştır (Şekil 4.6). 4 kodlu (227,2 HV<sub>0,2</sub>) ve 5 kodlu (222 HV<sub>0,2</sub>) numunelerin ITAB’larında BM sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Özellikle AK-ITAB’da gerçekleşen bu sertlik düşüşünün sebebi BM yapısındaki martenzitin temperlenmesi ve içyapıdaki poligonal ferrit oluşumunun artmasıdır. 4 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM’ye göre mikro sertlik düşüşü %3,32 iken 5 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM’ye göre mikro sertlik %5,53 düşmüştür. ITAB genişlikleri 4 ve 5 kodlu numunelerde 0,4 mm civarındadır. Ayrıca iki numunenin de ITAB’larında EB sınırında sertlikte bir yükselme (sebebi bu bölgedeki ince taneli ve ince lamelli etkin bir martenzit oluşumu) ve devamında BM bölgesine doğru martenzit miktarının azalmasına bağlı olarak ve BM içyapısındaki martenzitin de temperlenmesiyle beraber keskin düşüşler gözlenmiştir.

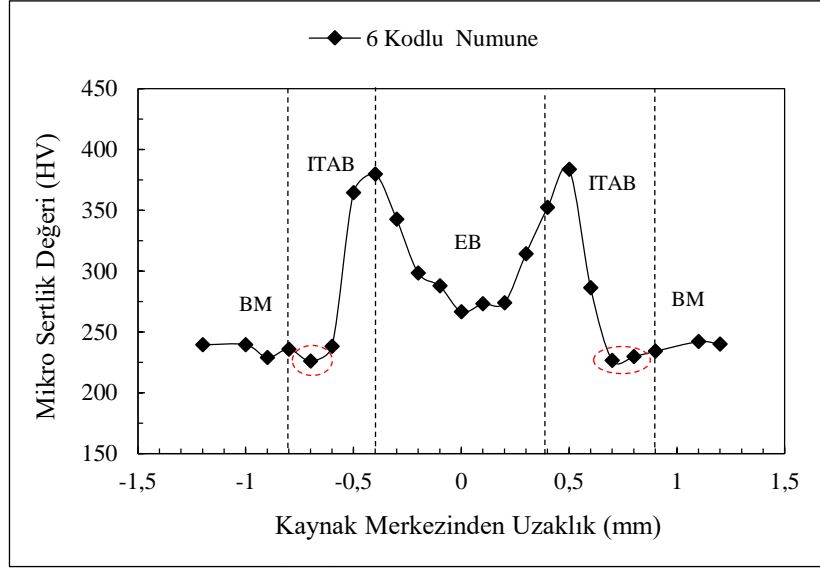


Şekil 4.21. 4 kodlu numune (Darbe gücü:6,5 kW-45,1 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

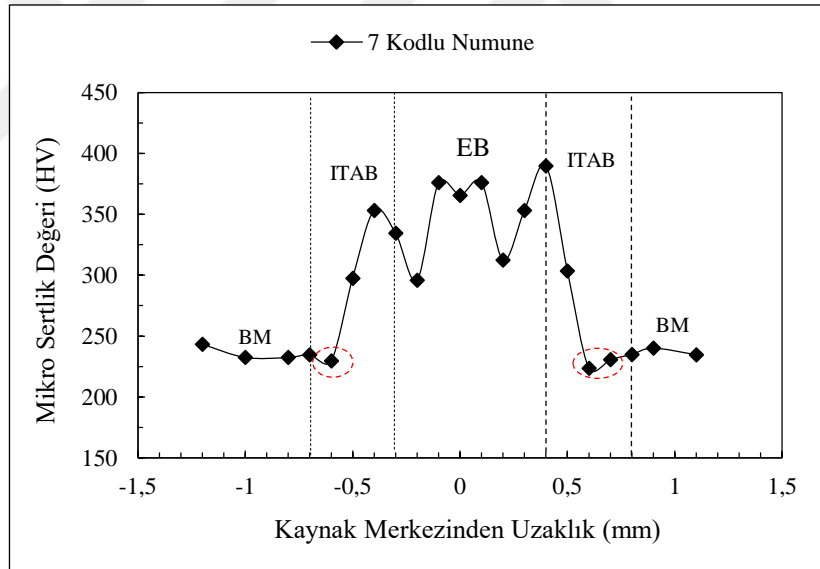


Şekil 4.22. 5 kodlu numune (Darbe gücü:7,5 kW-52 joule/mm) kaynak bölgesi sertlik değişimi

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı frekanslarda (7,5 Hz, 8 Hz ve 8,5 Hz) birleştirilen 6, 2 ve 7 kodlu numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numune (7,5 Hz-45,5 J/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numuneye (8,5 Hz-51,6 J/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. 6 kodlu numunenin EB genişliği 0,8 mm iken 7 kodlu numunenin EB genişliği 0,6 mm'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte ITAB genişliğinin arttığı EB genişliğinin azaldığı 6 ve 7 kodlu numunelerin makro yapı fotoğraflarının yer aldığı Şekil 4.5'te görülmüştü. 6 kodlu numunenin EB'sinde ortalama 310 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve KM'ye yakın kısımlarda ise ortalama mikro sertliğin altında sertlik değerleri ölçülmüştür. 7 kodlu numunenin EB'sinde ise ortalama 345 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değeri ölçülmüş ve KM'ye yakın kısımlarda ortalama sertliğin üzerinde sertlik değerleri ölçülmüştür. 7 kodlu numunenin EB'sinde 6 kodlu numunenin EB'sinden daha ince lamelli ve etkin martenzit oluşumunun gerçekleştiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir. 6 kodlu numune (226,1 HV<sub>0,2</sub>) ve 7 kodlu numunede (223,5 HV<sub>0,2</sub>) yumuşama bölgesi olan AK-ITAB'da BM sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 6 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %3,79 iken 7 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %4,89 düşmüştür. BM'deki martenzitin temperlenmesi ve poligonal ferrit miktarındaki artış bu bölgedeki sertlik düşüşlerine neden olmuştur. ITAB genişlikleri 6 ve 7 kodlu numunelerde 0,4 mm civarındadır. Fakat mikro sertlik ölçümlerinde belirgin bir şekilde ortaya çıkmasa da makro yapı görüntülerinde 7 kodlu numunenin ITAB genişliğinin 6 kodlu numunenin ITAB genişliğinden daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.8). Ayrıca iki numunenin de ITAB'larının EB sınırında sertlikte bir yükselme ve devamında martenzit miktarının hızla azalmasına bağlı olarak BM'ye doğru keskin düşüşler gözlenmiştir.



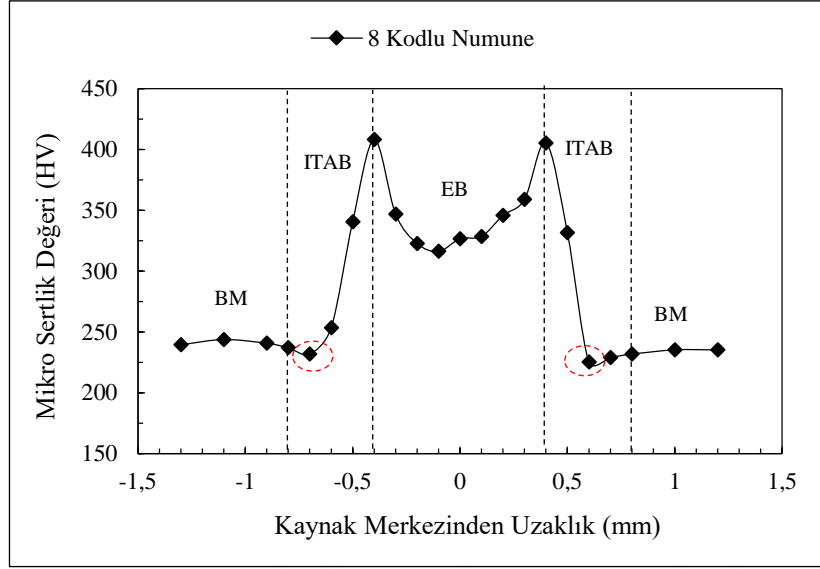
Şekil 4.23. 6 kodlu numune (Frekans: 7,5 hz-45,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



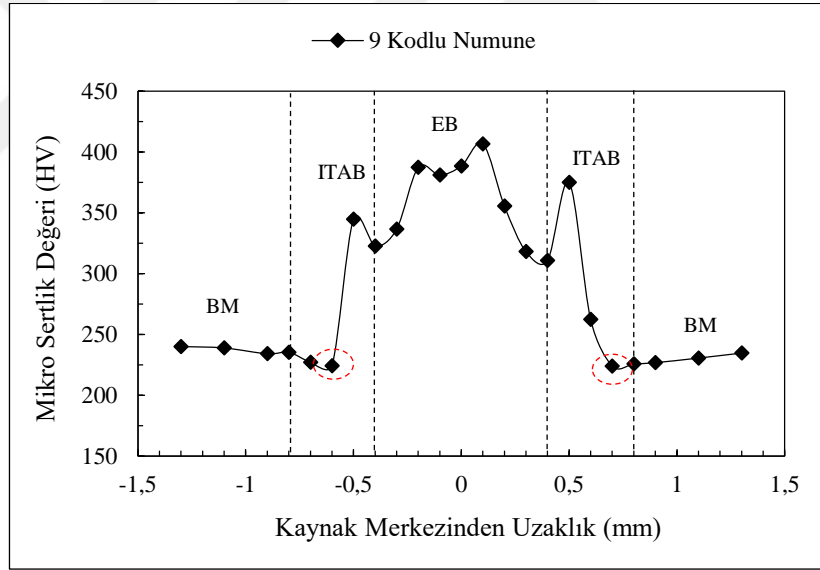
Şekil 4.24. 7 kodlu numune (Frekans: 8,5 hz-51,6 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı ışın çapları ile (1 mm, 1,1 mm ve 1,2 mm) birleştirilen 8, 2 ve 9 kodlu numunelerden en düşük ışın çapına sahip 8 kodlu numune (1 mm) ve en yüksek ışın çapına sahip 9 kodlu numuneye (1,2 mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Her iki numune de 48,5 joule/mm'lik eşit ısı girdisine sahiptir. 8 ve 9 kodlu numunelerin EB genişlikleri 0,8 mm'dir. 8 kodlu numunenin EB'sinde KM'de ortalama 335 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değerleri ölçülürken, 9 kodlu numunenin EB'sinde ortalama 368 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değeri ölçülmüştür. 9 kodlu numune EB'sinde 8 kodlu numunenin EB'sine göre daha ince lamelli martenzit oluşumu Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Işın çapının artması EB mikro sertlik değerlerini arttırmıştır. 8 kodlu numune ITAB (225,2 HV<sub>0,2</sub>) ve 9 kodlu numune ITAB'da (224 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. 8 kodlu numune AK-ITAB yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %4,17 iken 9 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %4,68 düşmüştür. Işın çapındaki artışla beraber 9 kodlu numunede 8 kodlu numuneye göre ITAB genişliğindeki artış (Şekil 4.13) AK-ITAB yumuşama bölgesinde martenzin daha fazla temperlenmesi ve poligonal ferrit miktarındaki az da olsa artış sonucu daha düşük sertliğin ölçülmesine neden olmuştur. ITAB genişlikleri 8 ve 9 kodlu numunelerde 0,4 mm'dir. Ayrıca 8 kodlu numunenin ITAB EB sınırında sertlikte bir yükselme ve devamında BM bölgesine doğru keskin düşüş gözlenirken, 9 kodlu numunenin de ITAB EB sınırında sertlikte bir düşüş, devamında ise küçük bir bölgede yükselme ve BM bölgesine doğru keskin düşüş gözlenmiştir. ITAB'daki sertlikte yükselişin sebebi bu bölgede oluşan ince taneli ve ince lamelli etkin martenzit oluşumudur. Devamında BM'ye doğru ise içyapıdaki martenzit oranının hızla azalması keskin düşüşün sebebidir.

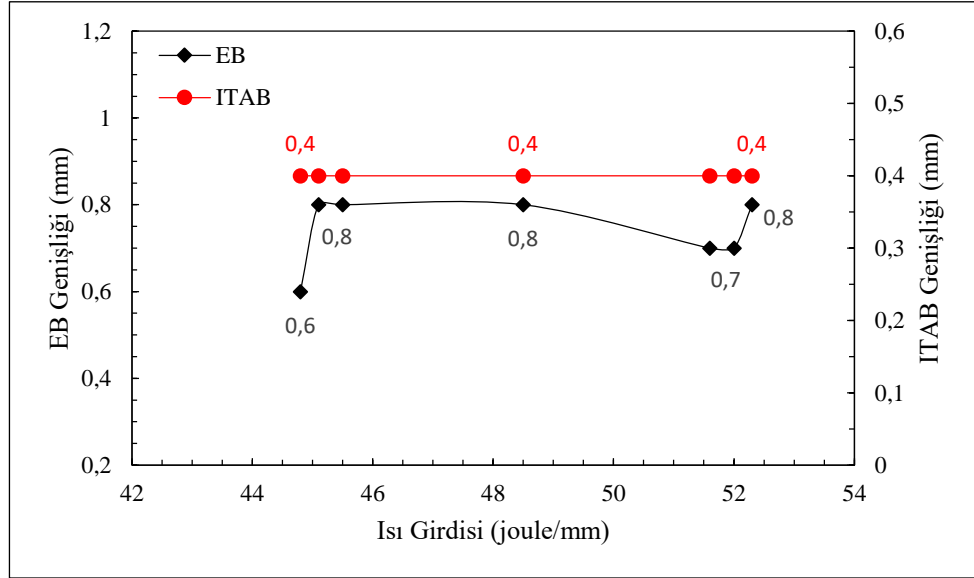


Şekil 4.25. 8 kodlu numune (Işın çapı: 1 mm-45,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



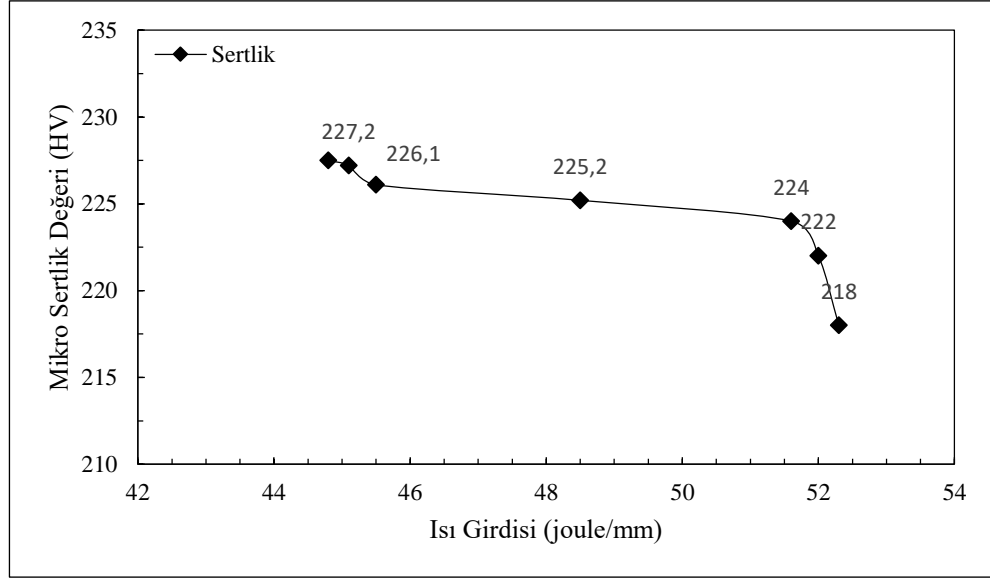
Şekil 4.26. 9 kodlu numune (Işın çapı: 1,2 mm-45,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Mikro sertlik ölçümü sonucu ortaya çıkan EB ve ITAB genişliklerinin ısı girdisi ile değişimi Şekil 4.27’de gösterilmiştir. ITAB genişliği tüm numunelerde parametrelerin ve ısı girdisinin etkisinden bağımsız olarak 0,4 mm civarındadır. Kaynak parametrelerinin dolayısıyla ısı girdisinin ITAB genişliğine olan etkisi sınırlı kalmıştır. Kaynak parametrelerinin dar bir aralıkta değişmesi ve en yüksek ısı girdisiyle en düşük ısı girdisi arasında çok fazla fark olmaması bu sınırlı değişimin nedenidir. Kaynak bölgesi makro yapı incelemelerinde ITAB genişlikleri genel itibariyle 0,4 mm’den düşük çıkmıştır. Ayrıca parametre değişimleri ile numuneler arasında ITAB genişliklerinde düşük de olsa farklılıklar görülmektedir. Fakat ITAB makro yapı incelemelerinde AK-ITAB ile BM’ye geçiş ve tamamen BM’ye geçtiği bölgeyi net olarak işaretlemek mümkün olamamaktadır. Bu yüzden makro yapı işaretlemeleri genel itibariyle kaynak genişliği ve kaynak derinliği hakkında daha net fikir sahibi olmamızı sağlamıştır. Ayrıca mikro sertlik ölçümlerinde iki sertlik izi merkezi arasındaki mesafenin 0,1 mm olması 0,4 mm civarı dar ITAB genişliğine sahip olan numunelerde net bir genişlik ölçümü alınmasını engellemiş ve hata payını arttırmıştır. EB genişlik ölçümlerinde de ısı girdisiyle EB genişliği hakkında doğrudan bir bağlantı kurmak mümkün olamamıştır (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi

Şekil 4.28’de DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerde farklı ısı girdisiyle ITAB yumuşama bölgelerinde ölçülen en düşük mikro sertliğin değişimi gösterilmektedir. Isı girdisindeki artış ile mikro sertlik değerleri azalmaktadır. En düşük ITAB yumuşama bölgesi mikro sertlik değeri ısı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numunede (52,3 joule/mm) 218 HV<sub>0,2</sub>’dir. 3 kodlu numunede BM’ye göre (235±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %7,23 düşüktür. Farklı parametrelerle birleştirilen numuneler içerisinde ölçülen en düşük ITAB yumuşama bölgesi sertliklerinden en yüksek ITAB mikro sertlik değeri ise ısı girdisinin en düşük olduğu 1 kodlu numunede (44,8 joule/mm) 227,5 HV<sub>0,2</sub>’dir. 1 kodlu numunede BM’ye göre (235±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %3,19 düşüktür. ITAB yumuşama bölgesi genişlikleri genel itibariyle 0,1 mm civarı olmasının nedeni tüm numunelerde ısı girdisinin dar bir aralıkta (44,8 joule/mm-52,3 joule/mm) değişiklik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Dong ve ark. (2016) çalışmalarında 1,4 mm kalınlığında DP780 ve DP980 sacları farklı türde olacak şekilde Nd:YAG lazer kaynağı ile alın alın birleştirip mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik testler kapsamında gerçekleştirdikleri mikro sertlik deneylerinde EB, ÜK-ITAB (KT-ITAB ve İT-ITAB’ları içeren bölge) ve İK-ITAB’da sertlik yükselirken DP780 ve DP980 tarafında AK-ITAB’da BM’den daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu düşüşün nedeni de Nd:YAG lazer kaynaklı numunede sadece bu bölgede oluşan temperlenmiş martenzitin yumuşamaya sebep olup mekanik özellikleri düşürmesidir. Şekil 4.28’deki sertlik düşüşlerinin sebebi de Dong ve arkadaşlarının çalışmasında olduğu gibi BM yapısında bulunan martenzitin temperlenmesidir.



**Şekil 4.28.** Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değerlerinin değişimi

### 4.1.3 Çekme Testleri

Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen DP800-DP800 kombinasyonundaki numunelerin çekme testi sonuçları ve kırılma bölgeleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Tüm numuneler KM’den kırılmıştır. Kaynak kökünde birleşmenin gerçekleşmemesi kaynak kökünde gerilme yığılması oluşturarak kırılmanın KM’den gerçekleşmesine sebep olmuştur. Ayrıca kaynak sırasındaki darbe enerjisi (joule), ortalama güç (W) ve ısı girdisi de (joule/mm) Çizelge 4.2’de gösterilmektedir. Çekme testlerinde kaynak parametrelerinden darbe süresi (ms), darbe gücü (kW), frekans (hz) ve ışın çapı (mm) değişimi ile çekme mukavemeti (MPa) ve yüzde uzamanın (%) nasıl değiştiği belirlenmiştir. Çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya ait standart sapma değerleri de Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Ayrıca tüm kırılmalar KM’de gerçekleştiğinden dolayı çekme mukavemeti ve uzama değerlerini kaynak bölgesi mikro yapı ve sertlik değerlerinden ziyade kaynak derinliği belirlemiştir.

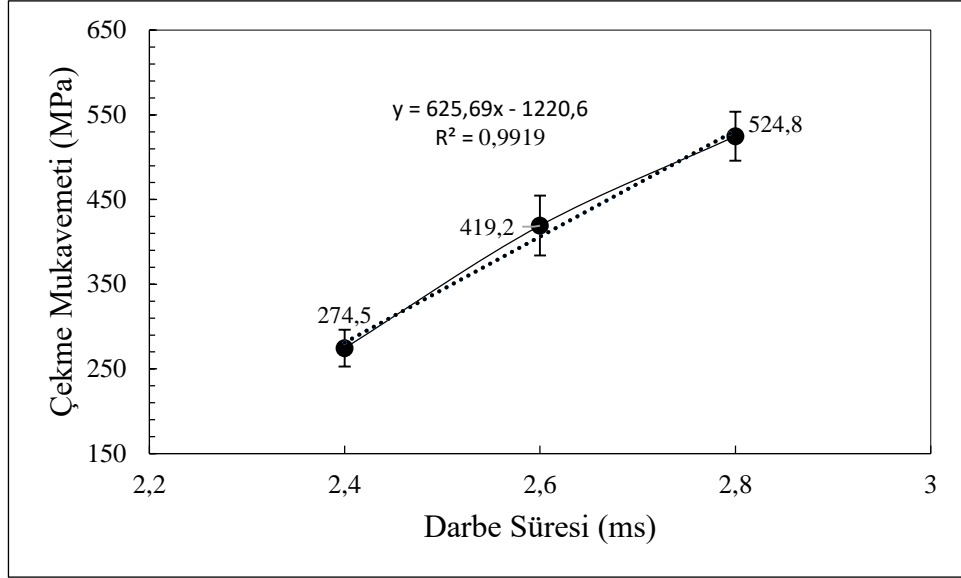
**Çizelge 4.1.** Farklı parametrelerle üretilen DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Yüzde Uzama (%)	Standart Sapma	Kırılma Bölgesi
1	274,5	21,8	1,59	0,17	KM
2	419,7	35,3	2,34	0,24	KM
3	524,8	28,8	2,99	0,27	KM
4	339,9	42	1,64	0,34	KM
5	456,3	10,7	2,69	0,1	KM
6	410,3	51,3	2,29	0,12	KM
7	430,9	44,2	2,6	0,33	KM
8	490,5	66,9	2,82	0,12	KM
9	305	33,2	1,51	0,14	KM

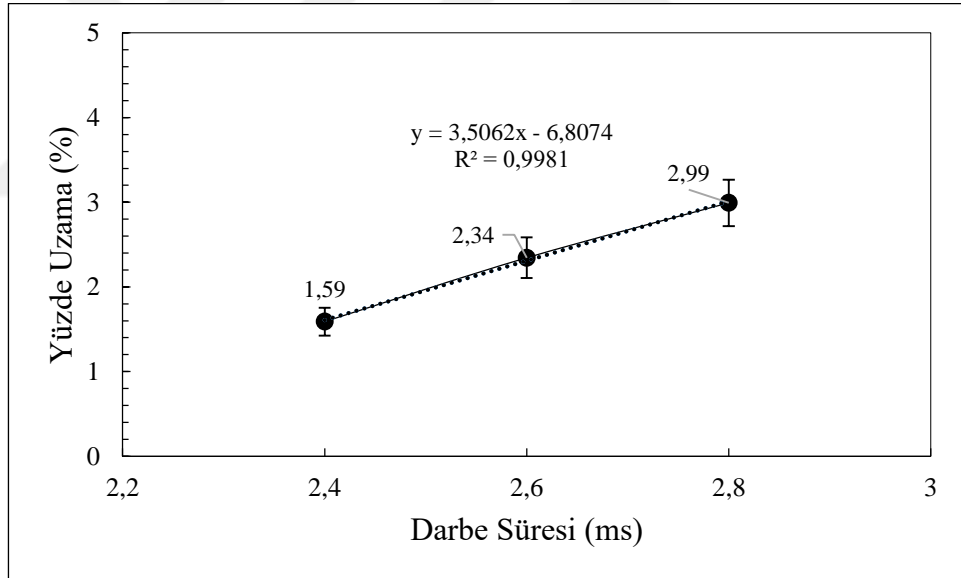
**Çizelge 4.2.** Farklı parametrelerle üretilen Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerde darbe enerjisi (joule), ortalama güç (W) ve ısı girdisi (joule/mm) değerleri

<b>Numune Kodu</b>	<b>Darbe Enerjisi (Joule)</b>	<b>Ortalama Güç (W)</b>	<b>Isı Girdisi (Joule/mm)</b>
1	16,8	134,4	44,8
2	18,2	145,6	48,5
3	19,6	156,8	52,3
4	16,9	135,2	45,1
5	19,5	156	52
6	18,2	136,5	45,5
7	18,2	154,7	51,6
8	18,2	145,6	48,5
9	18,2	145,6	48,5

Çekme testi sonucu darbe süresi (ms), darbe gücü (kW), frekans (hz) ve ışın çapı (mm) ile çekme mukavemeti (MPa) ve yüzde uzama (%) değişimleri Şekil 4.29-Şekil 4.36 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.29'da 1, 2 ve 3 kodlu numunelerde darbe süresi ile çekme mukavemeti değişimi gösterilmiştir. Darbe süresi 2,4 ms'den 2,8 ms'ye çıkarıldığında çekme mukavemeti 274,5 MPa'dan 524,8 MPa'a yükselmiştir. Darbe süresindeki artış ile çekme mukavemeti artmıştır. Şekil 4.30'da ise 1, 2 ve 3 kodlu numunelerde darbe süresi ile yüzde uzama değişimi gösterilmiştir. Uzama değerleri genel itibariyle çok düşük kalsa da darbe süresi ile yüzde uzama değerleri de artmıştır. Darbe süresi 2,4 ms'den 2,8 ms'ye çıkarıldığında yüzde uzama %1,59'dan %2,99'a yükselmiştir. Darbe süresi 2,4 ms'den 2,8 ms'ye arttırıldığında çekme mukavemeti %91,2 ve yüzde uzama %88,1 artmıştır. Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen DP800-DP800 saclar içerisinde en yüksek çekme mukavemeti (524,8 MPa) ve yüzde uzama (%2,99) değerleri tüm numuneler içerisinde en yüksek darbe süresine sahip (2,8 ms) 3 kodlu numunede elde edilmiştir.



**Şekil 4.29.** Çekme mukavemetinin darbe süresi ile değişimi

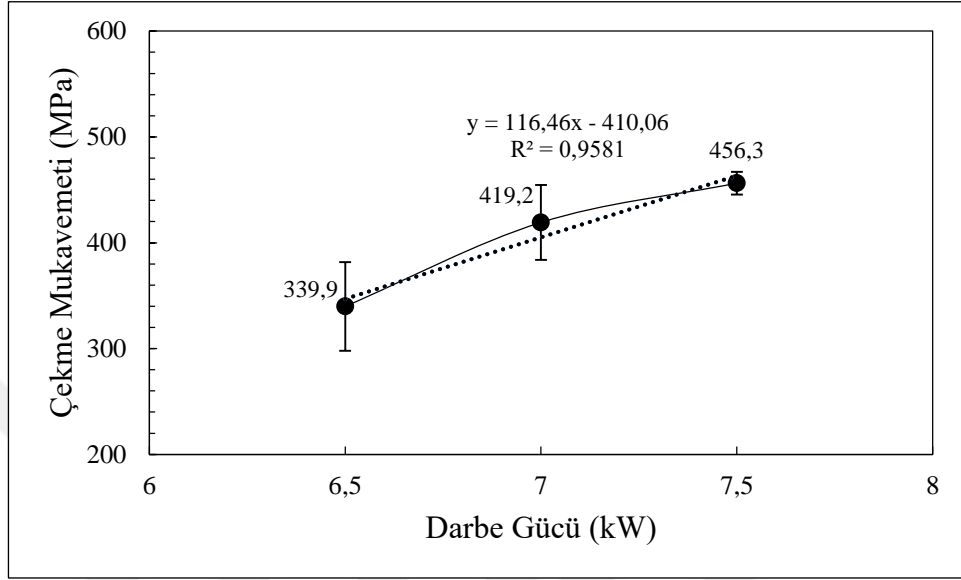


**Şekil 4.30.** Yüzde uzamanın darbe süresi ile değişimi

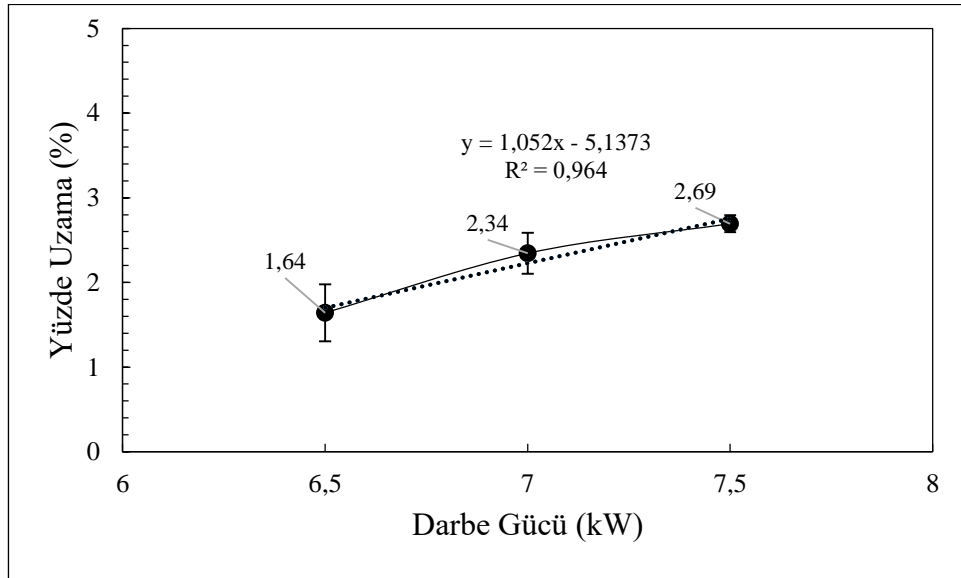
Darbe gücü (kW) ile çekme mukavemeti (MPa) ve yüzde uzama (%) değişimi sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir. Darbe gücünün 6,5 kW, 7 kW ve 7,5 kW olduğu numuneler sırasıyla 4, 2 ve 5 kodlu numunelerdir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de gösterildiği gibi darbe gücü (kW) arttırıldığında çekme mukavemeti (MPa) ve yüzde uzama (%) artmaktadır. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama darbe gücünün en düşük



olduğu (6,5 kW) 4 kodlu numunede 339,9 MPa ve %1,64 iken en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama darbe gücünün en yüksek olduğu (7,5 kW) 5 kodlu numunede 456,3 MPa ve %2,69'dur. Darbe gücü 6,5 kW'tan 7,5 kW'a arttırıldığında çekme mukavemeti %34,5 ve yüzde uzama %64 artmıştır.

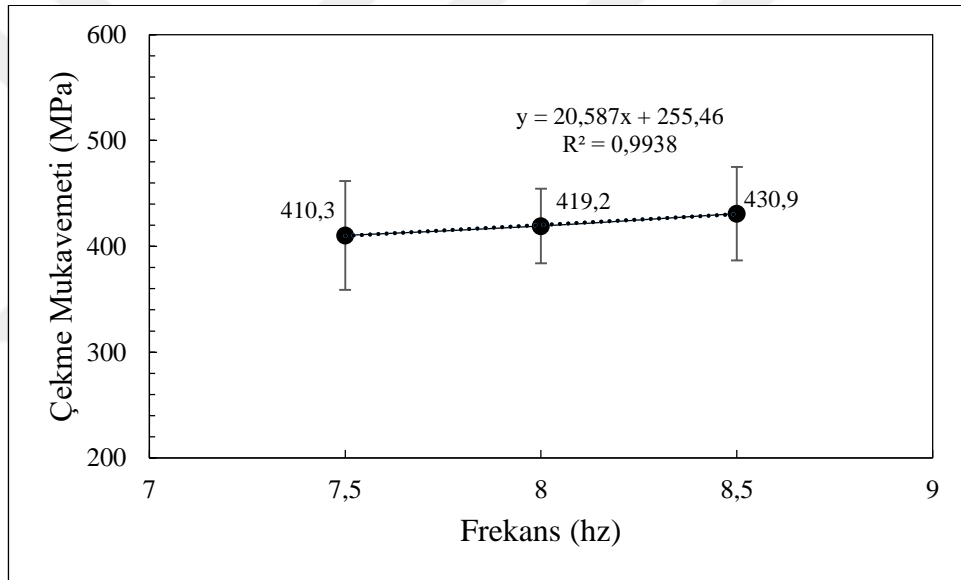


şekil 4.31. Çekme mukavemetinin darbe gücü ile değişimi

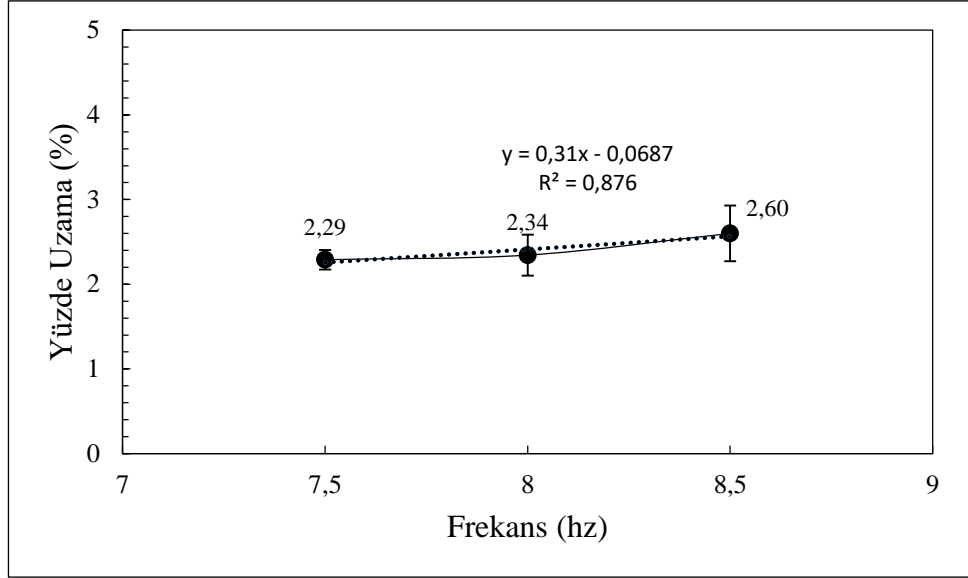


şekil 4.32. Yüzde uzamanın darbe gücü ile değişimi

Frekans (hz) ile çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimi sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterilmektedir. Frekans değeri 7,5 hz'den 8,5 hz'e kadar arttırılmıştır. 7,5 hz, 8 hz ve 8,5 hz frekans değerlerine sahip numuneler sırasıyla 6, 2 ve 7 kodlu numunelerdir. Frekans artışı ile birlikte çekme mukavemeti ve yüzde uzama artmaktadır. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri 6 kodlu numunede 7,5 hz frekans değeri için 410,3 MPa ve %2,29'tür. En yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri ise en yüksek frekans değerine sahip 7 kodlu numunede (8,5 hz) 430,9 MPa ve %2,6'dır. Frekans 7,5 hz'den 8,5 hz'e arttırıldığında çekme mukavemeti %5 ve yüzde uzama %13,5 artmıştır. Frekans değişimi ile çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimi nispeten sınırlı kalmıştır.

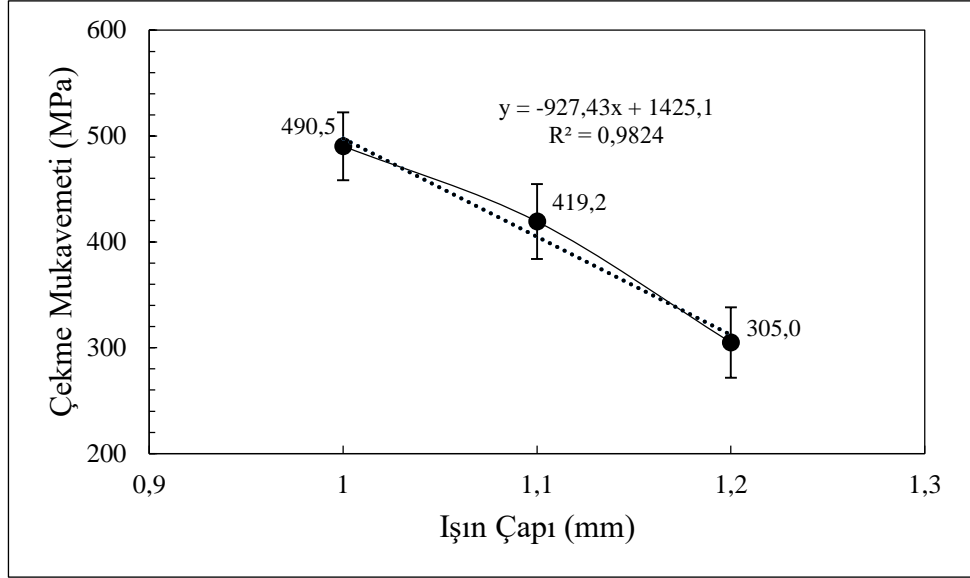


Şekil 4.33. Çekme mukavemetinin frekans ile değişimi

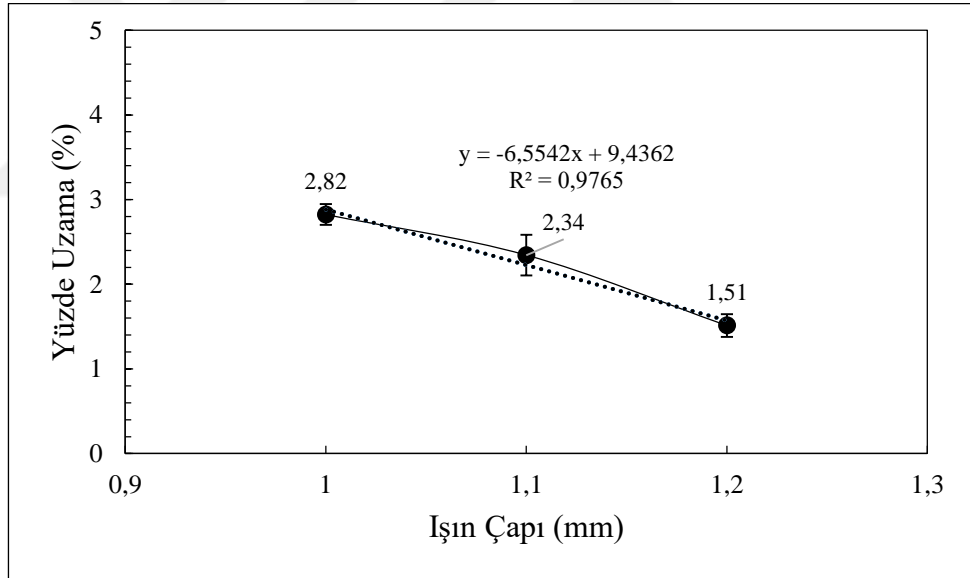


**Şekil 4.34.** Yüzde uzamanın frekans ile değişimi

Işın çapı ile çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimleri sırasıyla Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da verilmektedir. Işın çapının 1 mm, 1,1 mm ve 1,2 mm olduğu numuneler sırasıyla 8, 2 ve 9 kodlu numunelerdir. Işın çapı 1 mm'den 1, 2 mm'ye yükseltilirken çekme mukavemeti ve yüzde uzama azalmıştır. En yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama 1 mm ışın çapı için 490,5 MPa ve %2,82 iken en düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama 305 MPa ve %1,51'dir. Işın çapı 1 mm'den 1,2 mm'ye arttırıldığında çekme mukavemeti %37,8 azalırken yüzde uzama değeri de %46,5 azalmıştır.



Şekil 4.35. Çekme mukavemetinin ışın çapı ile değişimi



Şekil 4.36. Yüzde uzamanın ışın çapı ile değişimi

Kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4). ANOVA sonucuna bakıldığında çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %55,64 ve %38,48 ile en etkili parametre darbe süresi olmuştur. Işın çapı da darbe süresinden sonraki etkili parametredir. Frekansın etkisi ise çok sınırlı kalmıştır. Çekme mukavemetine %0,89 ve yüzde uzamaya %4,2 etkisi olmuştur.

**Çizelge 4.3.** Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

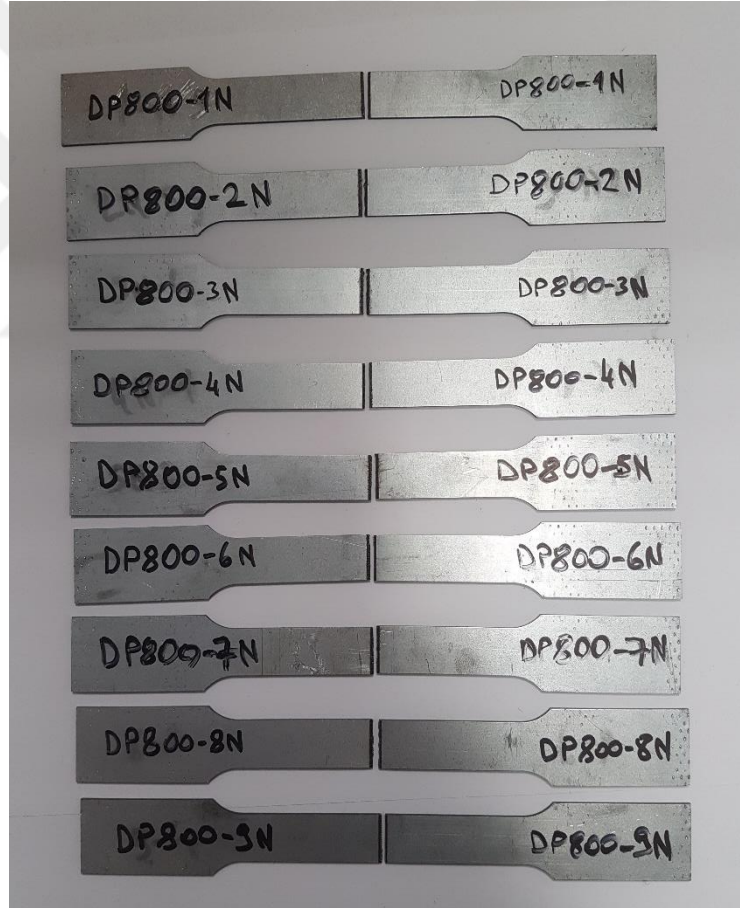
Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Darbe Süresi	2	31593,0	15796,5	-	-	55,64
Darbe Gücü	2	7085,5	3542,8	-	-	12,44
Frekans	2	212,7	106,4	-	-	0,89
Işın Çapı	2	17526,3	8763,2	-	-	31,04
Kalan Hata	0	-	-			-
Toplam	8					100

**Çizelge 4.4.** Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Darbe Süresi	2	0,98167	0,49083	-	-	38,48
Darbe Gücü	2	0,57167	0,28583	-	-	22,84
Frekans	2	0,05540	0,02770	-	-	4,2
Işın Çapı	2	0,87847	0,43923	-	-	34,47
Kalan Hata	0	-	-			-
Toplam	8					100

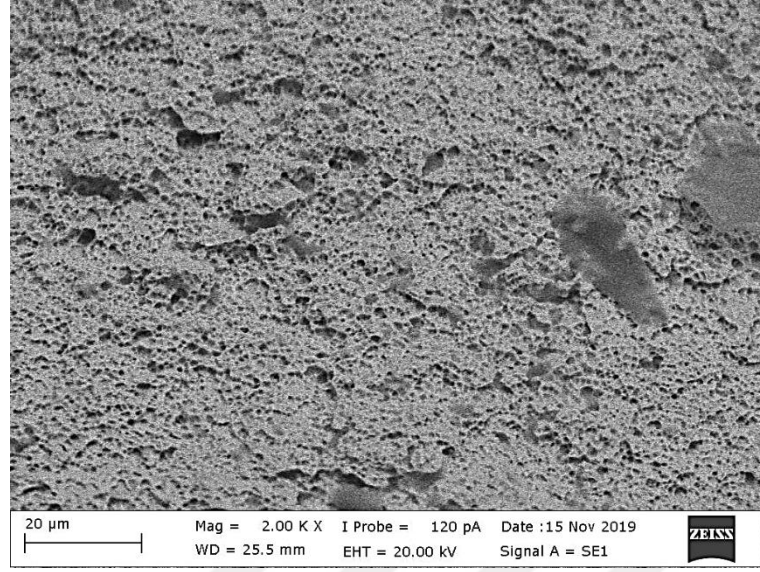
#### 4.1.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

DP800-DP800 kombinasyonunda Nd:YAG lazer kaynağı ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen numunelerin çekme testi sonucu kırılma yüzeyi görüntüleri incelendiğinde tüm numunelerin KM'den kırıldığı Şekil 4.37'de görülmektedir. Kaynak cihazının gücü yetersiz kaldığından dolayı parametreler daha yüksek değerlere çıkartılamamış ve seçili parametreler ile kaynak bölgesinde yeterli kaynak penetrasyon derinliği sağlanamamıştır. Kırılma yeterli birleşmenin olmadığı KM'de başlamış ve bu bölgede gerçekleşmiştir. Birleşmeyen kısım gerilme yığılması bölgesi olarak ön plana çıkarak makro çatlak etkisine sebep olmuştur.

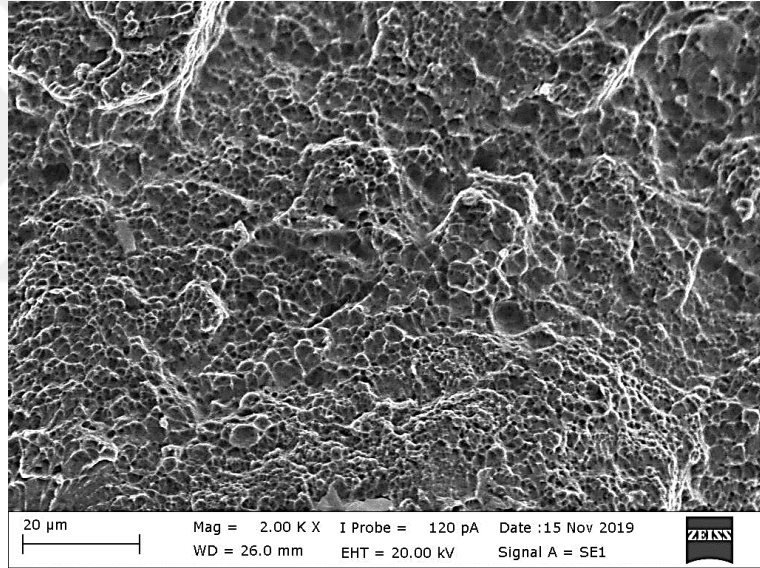


Şekil 4.37. Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler

Şekil 4.38’de DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen sırasıyla en düşük ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (44,8 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu kırılma numunesine (52,3 joule/mm) ait SEM görüntüleri verilmiştir. İki numune de genel itibariyle gevrek şekilde kırılmıştır. Düşük ısı girdisi nedeniyle 1 kodlu numunede metalik bağların bile tam anlamıyla oluşturulmadığı görülmektedir (Şekil 4.38a). Bu numunede KM civarında bağlantıyı zayıflatan ve gevrek kırılmayı teşvik eden yoğun mikro-porozite oluşumlarının da meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numunede ise metalik bağlanmanın gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4.38b). Genel olarak gevrek kırılma davranışı gözlenen bu numune sünek kırılma işaretleri de (yerel gerilme yığılmaları şeklinde) içermektedir.



a)



b)

**Şekil 4.38.** DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı a) 1 kodlu numune (44,8 joule/mm) b) 3 kodlu numuneye (52,3 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



## 4.2 DP800-DP800 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı birleştirmelerde kullanılan cihazın kapasitesi kaynak kökünde birleşme sağlayabilmek için yetersiz kalmıştır. Tek taraflı kaynakta yüksek mukavemet değerlerini elde etmenin mümkün olmadığı ve elde edilen mukavemet değerlerinin de otomotiv sanayinin ihtiyaçlarını karşılamayacağı anlaşılmıştır. Ayrıca Nd:YAG kaynak hızı da otomotiv sanayi için yavaş bulunmuştur. Bu dezavantajlardan dolayı tezin bundan sonraki kısımlarında Nd:YAG lazer kaynağı yerine fiber lazer kaynağı ile devam edilmiştir.

Bu kısımda DP800-DP800 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak (Çizelge 3.4) alın altına birleştirilen 1,2 mm kalınlığındaki kaynaklı numunelerin makro yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

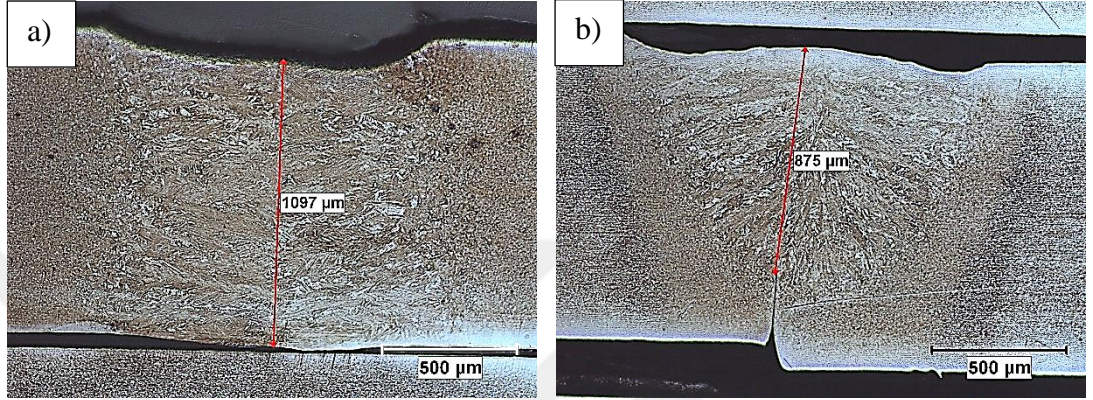
### 4.2.1 İy yapı İncelemeleri

1,2 mm kalınlığında DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numuneler farklı lazer güçlerinde ilerleme hızı değiştirilerek incelenmiştir. Her bir lazer gücü için en yüksek ve en düşük ısı girdisine sahip numuneler makro yapı ve mikro yapı incelemeleri için seçilmiştir. Makro yapı fotoğraflarında kaynak derinlikleri ölçülmüştür. EB ve ITAB'a ait mikro yapı fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. ITAB'da oluşan farklı bölgeler işaretlenerek gösterilmiştir. ITAB'da a, b, c ve d ile gösterilen kısımlar sırasıyla kaba KT-ITAB ( $A_3$  sıcaklığının üstü), İT-ITAB ( $A_3$  sıcaklığının üstü), İK-ITAB ( $A_1$ - $A_3$  sıcaklıkları arası) ve AK-ITAB'ı ( $A_1$  sıcaklığının altı) göstermektedir.

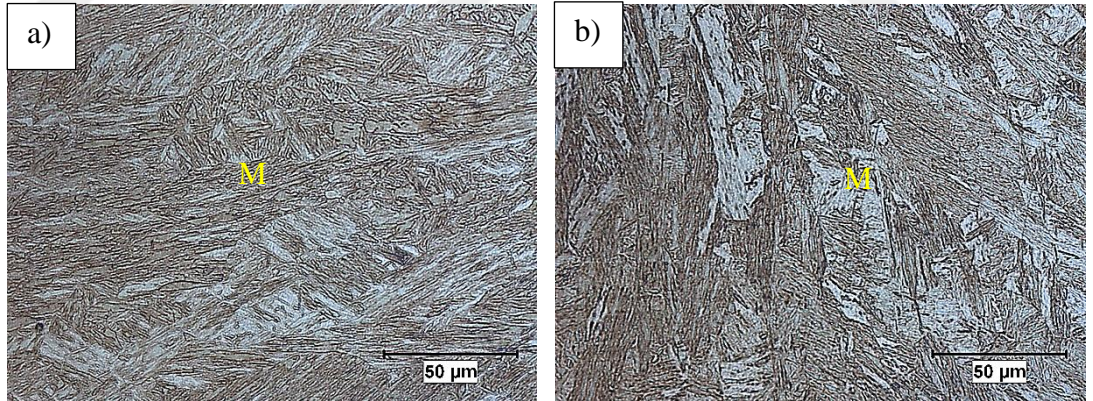
Şekil 4.39-Şekil 4.41 arasında en yüksek lazer gücü olan 2750 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) fiber lazer kaynağı ile birleştirilen ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (50 mm/sn-55 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (100 mm/sn-27,5 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. 1 kodlu numunenin ısı girdisi 3 kodlu numunenin ısı girdisinin iki katıdır. Şekil 4.39'da

sırasıyla 1 ve 3 kodlu numunelerin makro yapı fotoğrafları gösterilmiş ve kaynak derinliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 1 kodlu numunenin kaynak derinliği 1097  $\mu\text{m}$  iken 3 kodlu numunenin kaynak derinliği 875  $\mu\text{m}$ 'dir. 1 kodlu numunenin kaynak kökünde birleşme görülürken 3 kodlu numunede kaynak mukavemetini önemli ölçüde düşürecek kaynak kökünde birleşmeyen kısım vardır. 1 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme sağlanmasına rağmen kaynak numunesi kalınlığından (1,2 mm) daha düşük kaynak derinliğinin ölçülmesinin nedeni lazer ışınının ilk teması sırasındaki malzeme kaybıdır. Şekil 4.40'ta EB mikro yapıları gösterilmiştir. Her iki numunenin de EB'sinde genel itibariyle martenzitten oluşan içyapılar görülmektedir. Fakat 1 kodlu numunenin EB'sinde 3 kodlu numuneye göre daha etkin martenzit oluşmu vardır. Şekil 4.41'de 1 ve 3 kodlu numunelerin makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Şekil 4.41a ve Şekil 4.41c'de ITAB a, b, c ve d ile gösterilen bölgeler sırasıyla KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB bölgeleridir. Özellikle 1 kodlu numunede yüksek ısı girdisinin etkisiyle ITAB genişliğinin 3 kodlu numuneye göre yüksek oranda artışı dikkat çekicidir (Şekil 4.41). Her iki numunede de a ile gösterilen KT-ITAB bölgelerinde  $A_3$  sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa uzun sayılabilecek bir süre maruz kalmasından dolayı tane irileşmesi gerçekleşmektedir. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre tane irileşmesi daha fazladır (Şekil 4.41b,d). KT-ITAB'da içyapı genel itibariyle martenzitten oluşsa da beynit ve kalıntı ostenitin varlığı da söz konusu olacaktır. İT-ITAB'ı ifade eden b bölgesinde sıcaklık yine  $A_3$  sıcaklığının üzerindedir. Fakat a bölgesine göre bu bölgede sıcaklık daha düşük ve bu sıcaklığa maruz kalma süresi daha azdır. Bu bölgede sıcaklığın düşük olması ve yeniden kristallenme sayesinde ince taneli bir yapı ortaya çıkmaktadır. Bu bölge de genel itibariyle martenzitten oluşsa da KT-ITAB ile karşılaştırıldığında yapı içerisinde bulunabilecek beynit ve kalıntı ostenit miktarı daha fazla miktarda olacaktır. 1 ve 3 kodlu numunelerin İT-ITAB'ları kıyaslandığında 1 kodlu numunede yeniden kristallenme daha etkili olduğundan daha ince taneli bir içyapı oluşmuştur (Şekil 4.41b,d). Sıcaklığın  $A_1$ - $A_3$  arasında olduğu c ile gösterilen bölge İK-ITAB ve bu bölgedeki içyapı genel itibariyle martenzit ve ferritten oluşmaktadır. Tabi bu bölgede de BM içyapısındaki martenzitin sıcaklığın etkisiyle temperlenmesi söz konusu olacaktır. Ayrıca bu bölgenin EB tarafına doğru martenzite beynitte eşlik edecektir. Kalıntı ostenit miktarı da KT-ITAB ve İT-ITAB ile kıyaslandığında daha yüksek miktardadır. 1 ve 3 kodlu numunelerin İK-ITAB'ları kıyaslandığında ise 1 kodlu

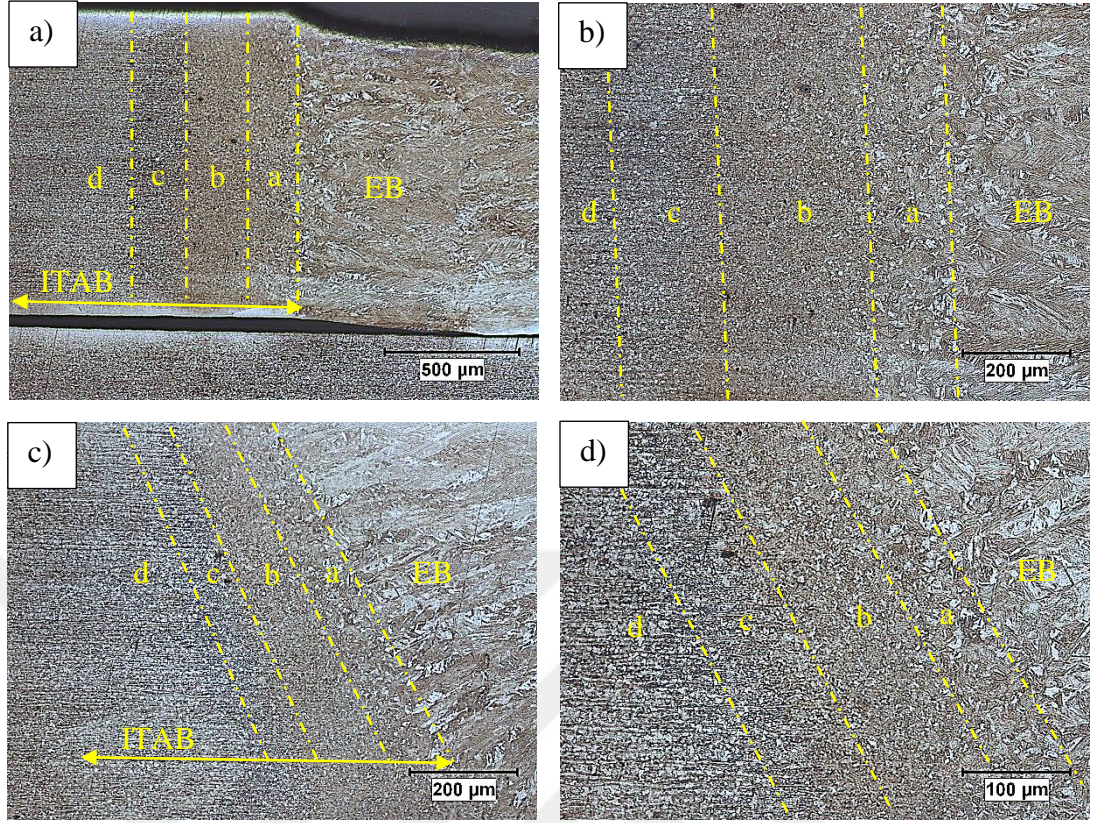
numunede 3 kodlu numuneye göre çok daha geniş İK-ITAB'ı olduğu görülmektedir (Şekil 4.41b,d). İK-ITAB'da sıcaklık  $A_1$ 'in altındadır. Bu da BM'deki martenzitin temperlenmesine sebep olmaktadır. Sıcaklığın  $A_1$  in üzerine çıkmaması ostenit oluşmasına izin vermemektedir. Sıcaklık artışı aynı zamanda AK-ITAB'da içyapıdaki ferrit tane boyutunun irileşmesine neden olmaktadır (Şekil 4.41b,d).



**Şekil 4.39.** a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn-55 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (2750 W, 100 mm/sn-27,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



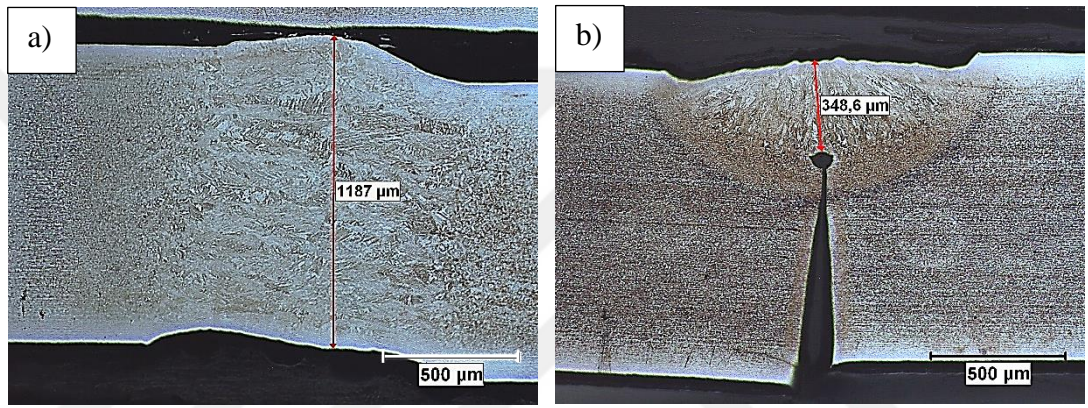
**Şekil 4.40.** a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (2750 W, 100 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



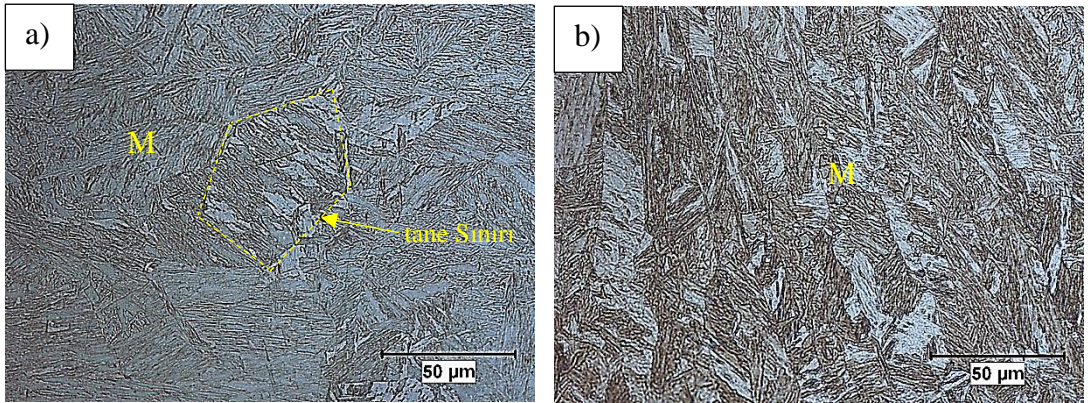
**Şekil 4.41.** a) 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (2750 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

2250 W lazer gücünde fiber lazer kaynağı ile farklı ilerleme hızlarında (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) birleştirilen ve ısı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numune (45 joule/mm) ile ısı girdisinin en düşük olduğu 6 kodlu numuneye (22,5 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.42-Şekil 4.44 arasında gösterilmiştir. Isı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunenin ısı girdisi 6 kodlu numunenin iki katıdır. Makro yapı görüntülerinde 4 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme sağlanırken (kaynak derinliği 1187 µm) 6 kodlu numunede ısı girdisinin yetersiz olmasından dolayı kaynak kökünde birleşmeyen kısım vardır (kaynak derinliği 348,6 µm) (Şekil 4.42). Ayrıca 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn) ve 2750 W lazer gücü ile birleştirilen 1 kodlu numunenin (2750 W, 50 mm/sn) ikisinde de kaynak kökünde birleşme sağlanmasına rağmen lazer gücünün daha düşük olduğu 4 kodlu numunede kaynak derinliği daha fazladır (Şekil 4.39-Şekil 4.42). Bu da 1 kodlu

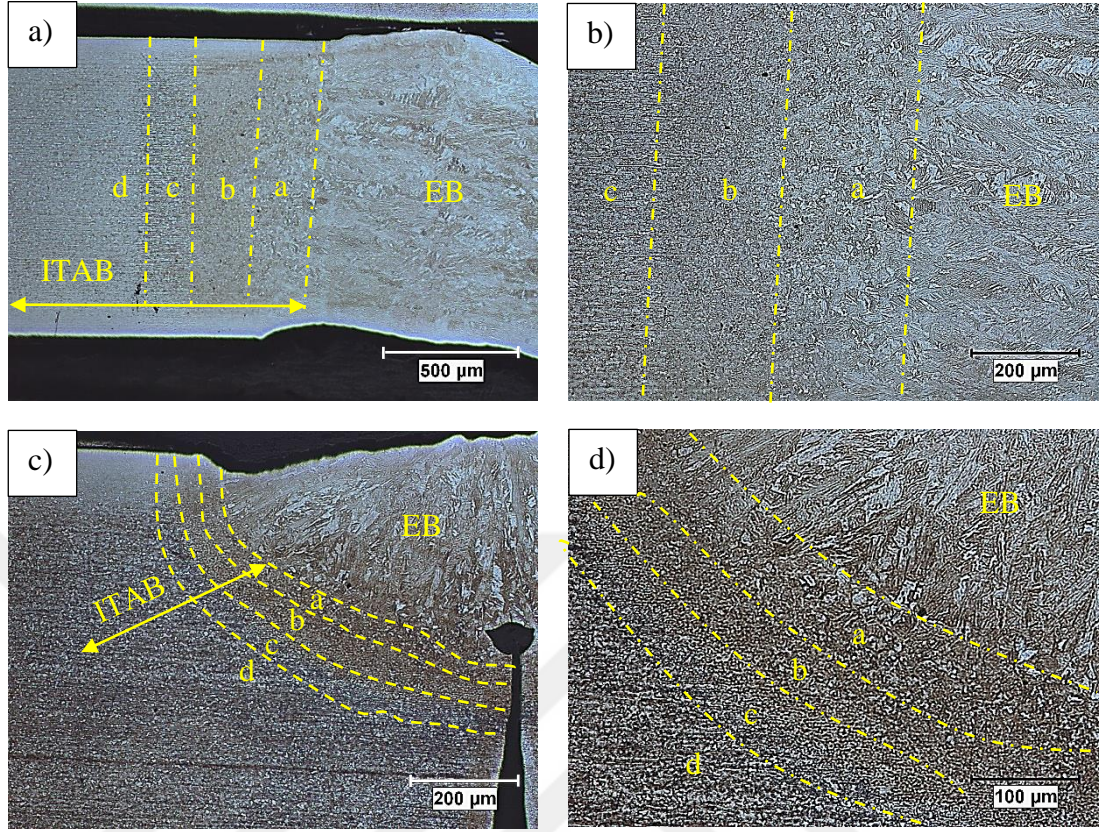
numunede uygulanan 2750 W lazer gücünün gereğinden fazla olduğunun bir işaretidir. 4 ve 6 kodlu numunelerde EB mikro yapıları ise genel itibariyle martenzitten oluşmuştur (Şekil 4.43). Fakat 4 kodlu numunenin EB'sinde yüksek ısı girdisi sebebiyle tane irileşmesi görülmektedir (Şekil 4.43a) . 4 ve 6 kodlu numunelerin ITAB makro yapı ve mikro yapı görüntüleri incelendiğinde 4 kodlu numune ısı girdisinin 6 kodlu numuneden fazla olmasından dolayı daha iri taneli ve geniş a bölgesi (KT-ITAB) ve yeniden kristallenmenin daha etkin olmasından dolayı daha geniş bir b bölgesine (İT-ITAB) sahiptir (Şekil 4.44).



**Şekil 4.42.** a) 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn-45 joule/mm) ve b) 6 kodlu numuneye (2250 W, 100 mm/sn-22,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



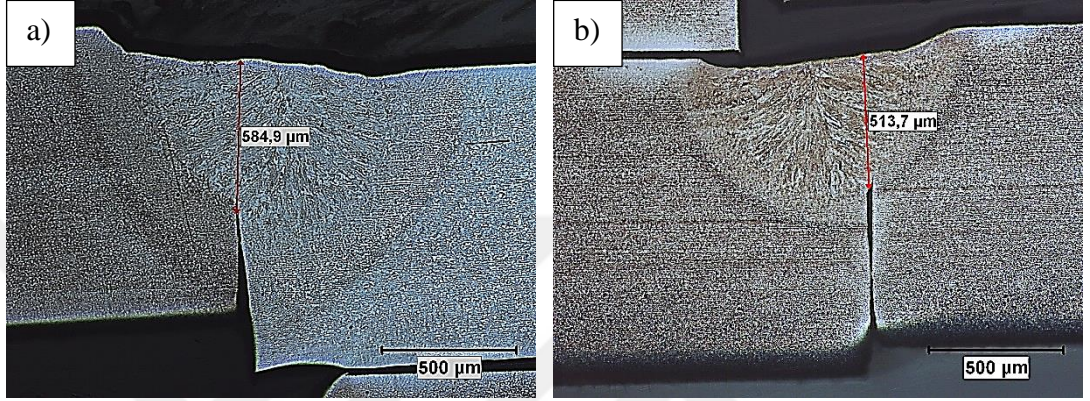
**Şekil 4.43.** a) 4 kodlu (2250 W, 50 mm/sn) ve b) 6 kodlu (2250 W, 100 mm/sn) numunelere ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



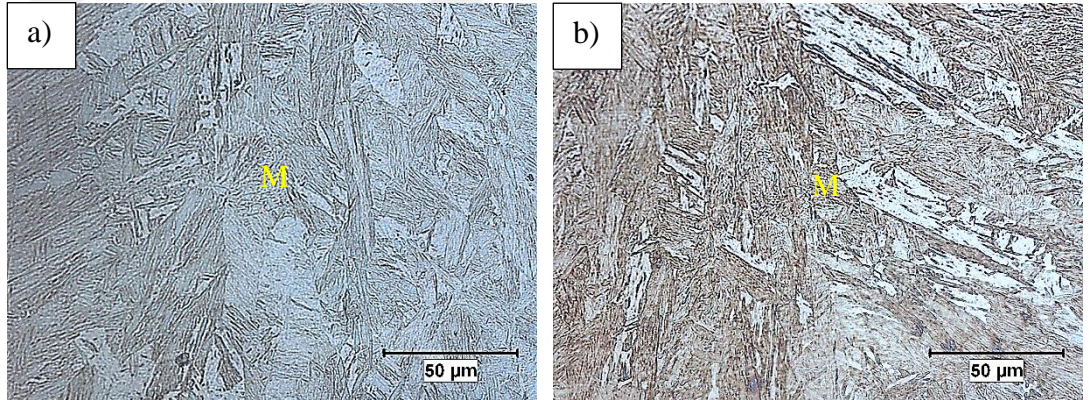
**Şekil 4.44.** a) 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (2250 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numunelerden en düşük lazer gücünde (1750 W) farklı ilerleme hızlarında (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) elde edilen ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numune (35 joule/mm) ile ısı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı görüntülerinde iki numune de ısı girdisinin kaynak kökünde birleşme için yetersiz kaldığı görülmüştür (Şekil 4.45). 7 ve 9 kodlu numunelerde kaynak derinlikleri sırasıyla 584,9 µm ve 513,7 µm gibi düşük değerlerdedir. Yine de 7 kodlu numunenin kaynak kesit alanının 9 kodlu numuneye çok daha geniş olduğu görülmektedir (Şekil 4.45). 7 ve 9 kodlu numunelerin EB'si genel itibariyle martenzitten oluşmaktadır (Şekil 4.46). EB mikro yapı görüntülerinde ayırt edici bir farka rastlanamamıştır. Isı girdisinin 7 ve 9 kodlu numunelerde düşük olmasından dolayı diğer numunelerle kıyaslandığında dar sayılabilecek ITAB makro ve mikro görüntüleri Şekil 4.47'de gösterilmiştir. 7 kodlu numune 9 kodlu numuneye kıyasla

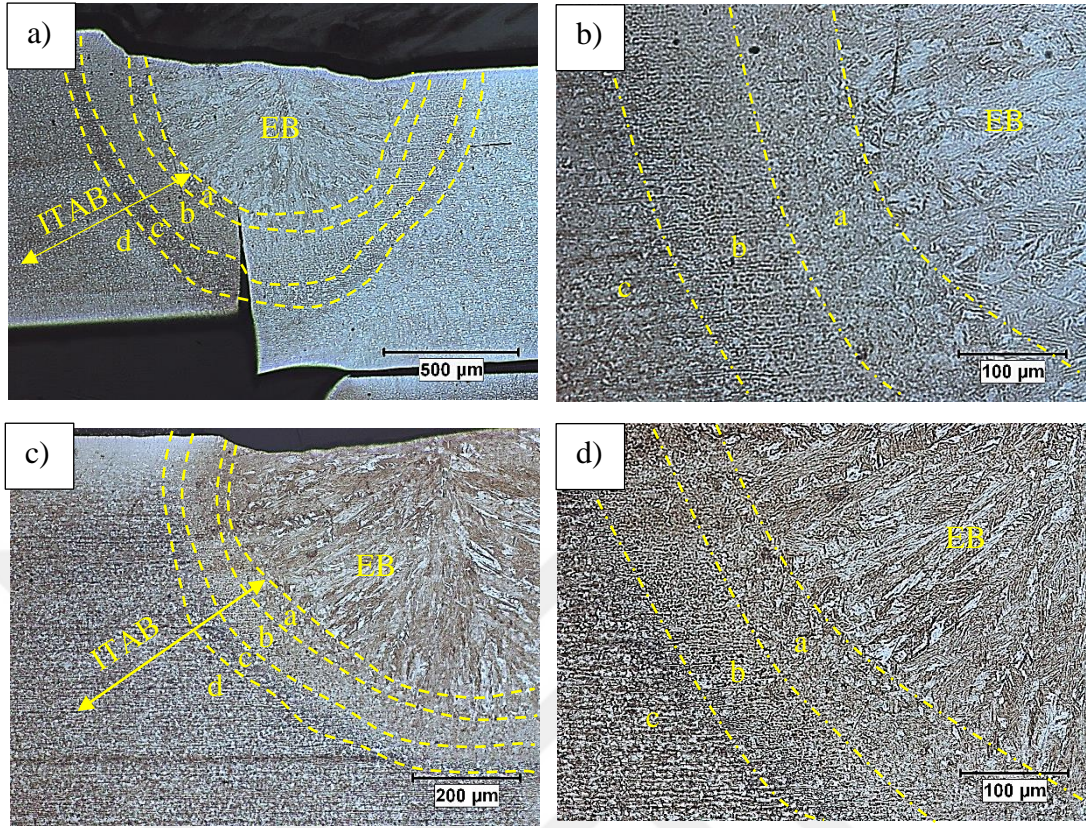
ısı girdisinin daha yüksek olmasından dolayı daha geniş bir ITAB'a sahiptir. Özellikle 7 kodlu numunenin yumuşama bölgesi olan AK-ITAB'ı 9 kodlu numunenin AK-ITAB'ı ile karşılaştırıldığında ısı girdisinin fazla olmasından dolayı martenzitin temperlenmesi daha şiddetli olacak ve temperlenmiş martenzit oranı daha yüksek olacaktır (Şekil 4.47b,d).



**Şekil 4.45.** a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn-35 joule/mm) ve b) 9 kodlu numuneye (1750 W, 100 mm/sn-17,5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



**Şekil 4.46.** a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn) ve b) 9 kodlu numuneye (1750 W, 100 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)

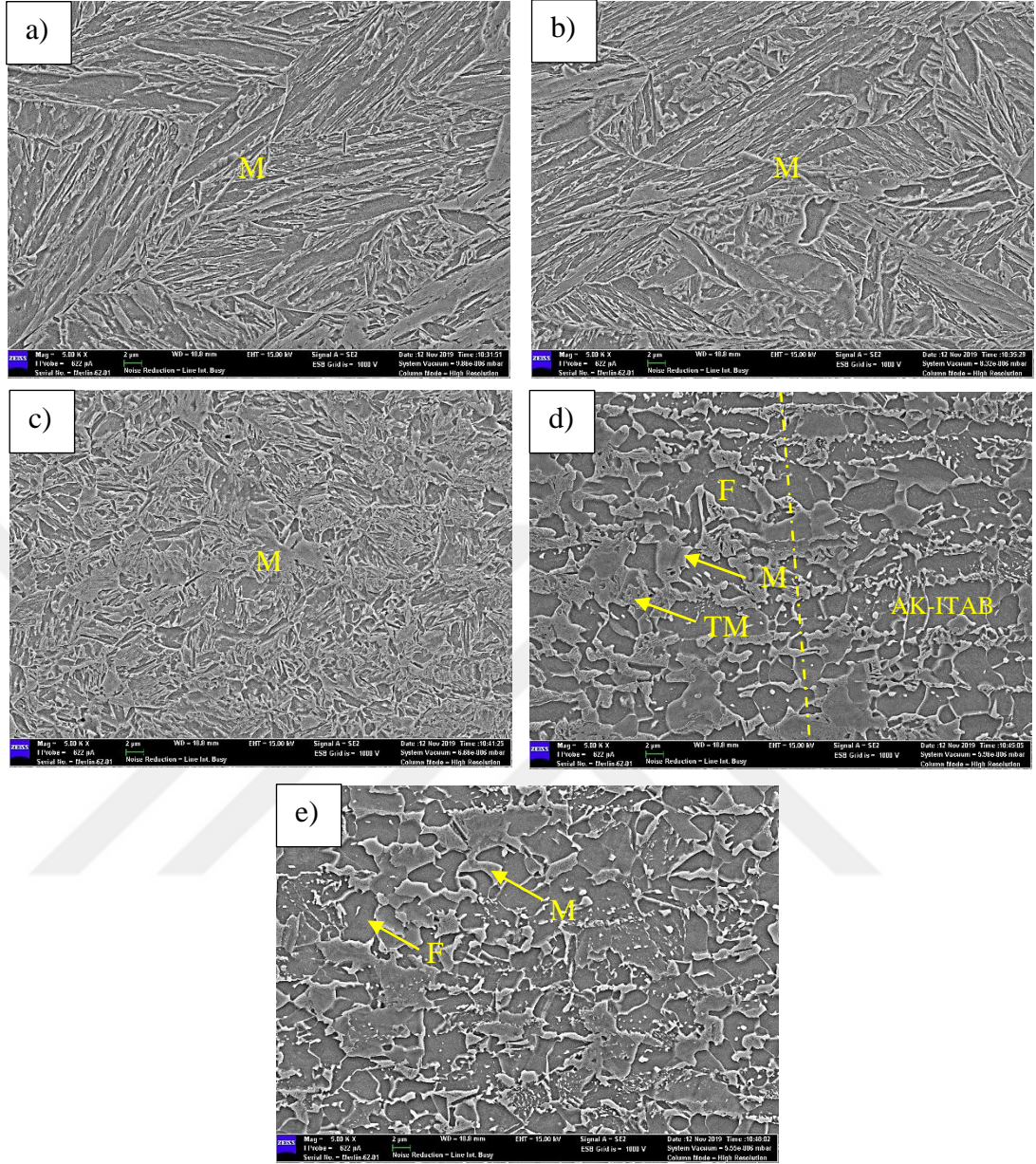


**Şekil 4.47.** a) 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (1750 W, 100 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

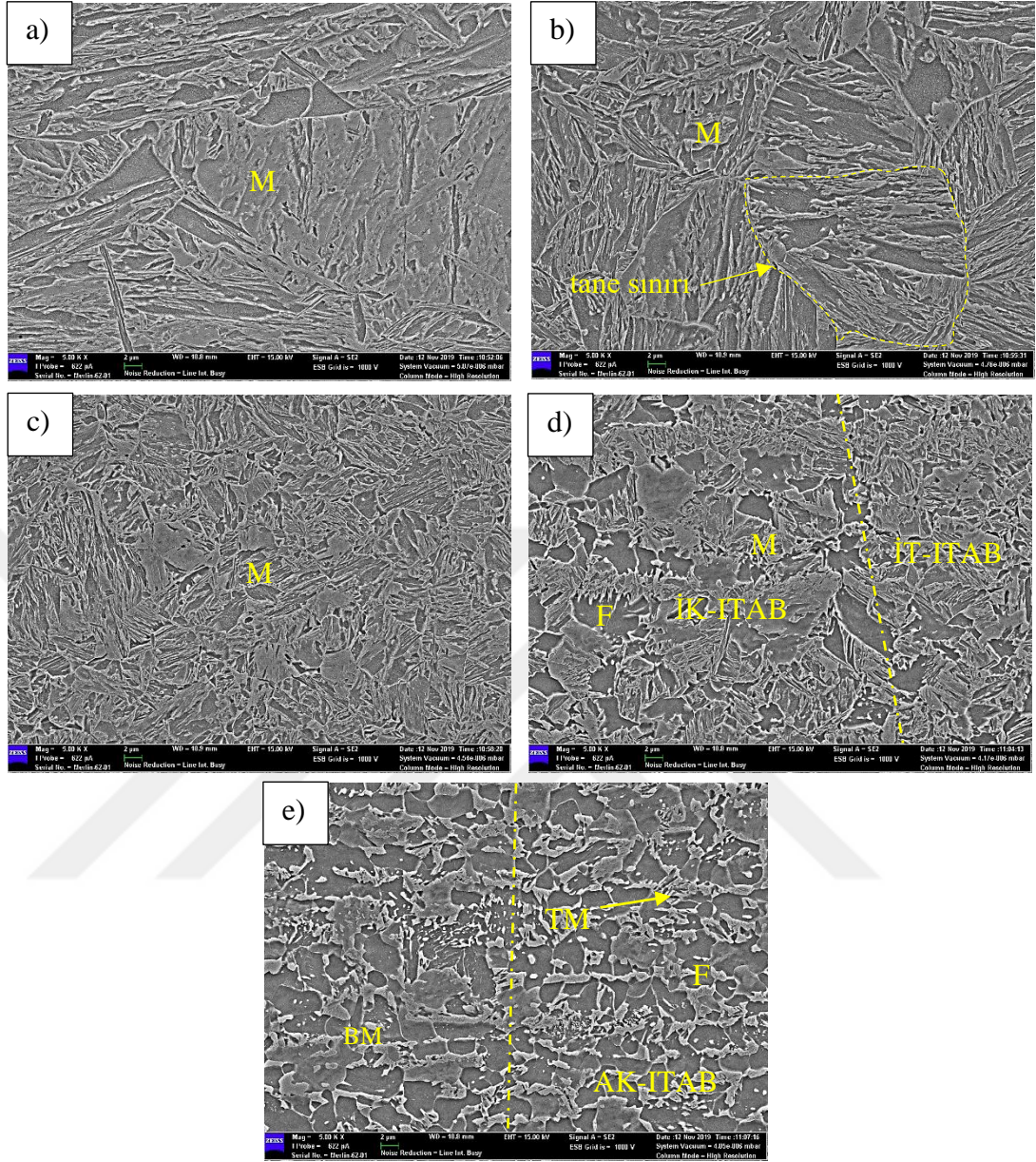
DP800-DP800 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde sırasıyla en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait Şekil 4.47c ve Şekil 4.41a'da optik mikroskop görüntülerinde işaretlenen EB, ITAB a, b, c, d bölgeleri ve BM SEM fotoğrafları Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da verilmiştir. 9 ve 1 kodlu numunelerin EB'si genel itibariyle martenzitten oluşmaktadır (Şekil 4.48a ve Şekil 4.49a). Isı girdisinin 1 kodlu numunede 9 kodlu numuneye göre yüksek olmasından dolayı 1 kodlu numunede daha etkin martenzit oluşumu vardır (Şekil 4.48a ve Şekil 4.49a). 9 ve 1 kodlu numunelerin KT-ITAB ve İT-ITAB'ları ise sıcaklığın  $A_3$  üzerine çıkmasından dolayı genel itibariyle martenzitten oluşmaktadır (Şekil 4.48b, Şekil 4.48c, Şekil 4.49b ve Şekil 4.49c). Her iki numunenin KT-ITAB'ında daha iri taneli ve İT-ITAB'ında ise ince taneli martenzit oluşumları net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.48b, Şekil 4.48c, Şekil 4.49b ve Şekil



4.49c). 9 ve 1 kodlu numunelerin KT-ITAB görüntüleri karşılaştırıldığında ısı girdisinin daha düşük olduğu ve daha az ısıya maruz kalan 9 kodlu numunede daha ince lamelli ve iğnesel martenzit oluşumu görülmüştür (Şekil 4.48b, Şekil 4.49b). Aynı zamanda 9 kodlu numunede 1 kodlu numuneye göre daha ince taneli İT-ITAB oluşmuştur (Şekil 4.48c, Şekil 4.49c). Isı girdisinin düşük olmasından dolayı 9 kodlu numunede çok dar bir bölgelede oluşan İK-ITAB ve AK-ITAB kesişimi Şekil 4.48d'de gösterilmiş olup bu bölgenin içyapısı martenzit, beynit, temperlenmiş martenzit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunenin İK-ITAB'ında ferrit ve martenzit fazlarından oluşan bir içyapı görülmektedir (Şekil 4.49d). 9 ve 1 kodlu numunelerin İK-ITAB görüntüleri karşılaştırıldığında ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede ferrit tane boyutunun irileşmesi söz konusudur (Şekil 4.48d, Şekil 4.49d). AK-ITAB'da ise BM içyapısındaki martenzitin temperlenmesi sonucu temperlenmiş martenzit ve ferritten oluşan bir içyapı görülmektedir (Şekil 4.49e). Özellikle 1 kodlu numunenin İK-ITAB ve AK-ITAB görüntüleri kendi içinde karşılaştırıldığında AK-ITAB'da martenzit oranında azalma ve ferrit oranındaki artış net bir şekilde belli olmaktadır (Şekil 4.49d,e). Ayrıca DP800 çeliğinin BM'sini oluşturan ferrit ve martenzit fazlarının birleşiminden oluşan içyapı görüntüsü Şekil 4.48e'de verilmektedir.



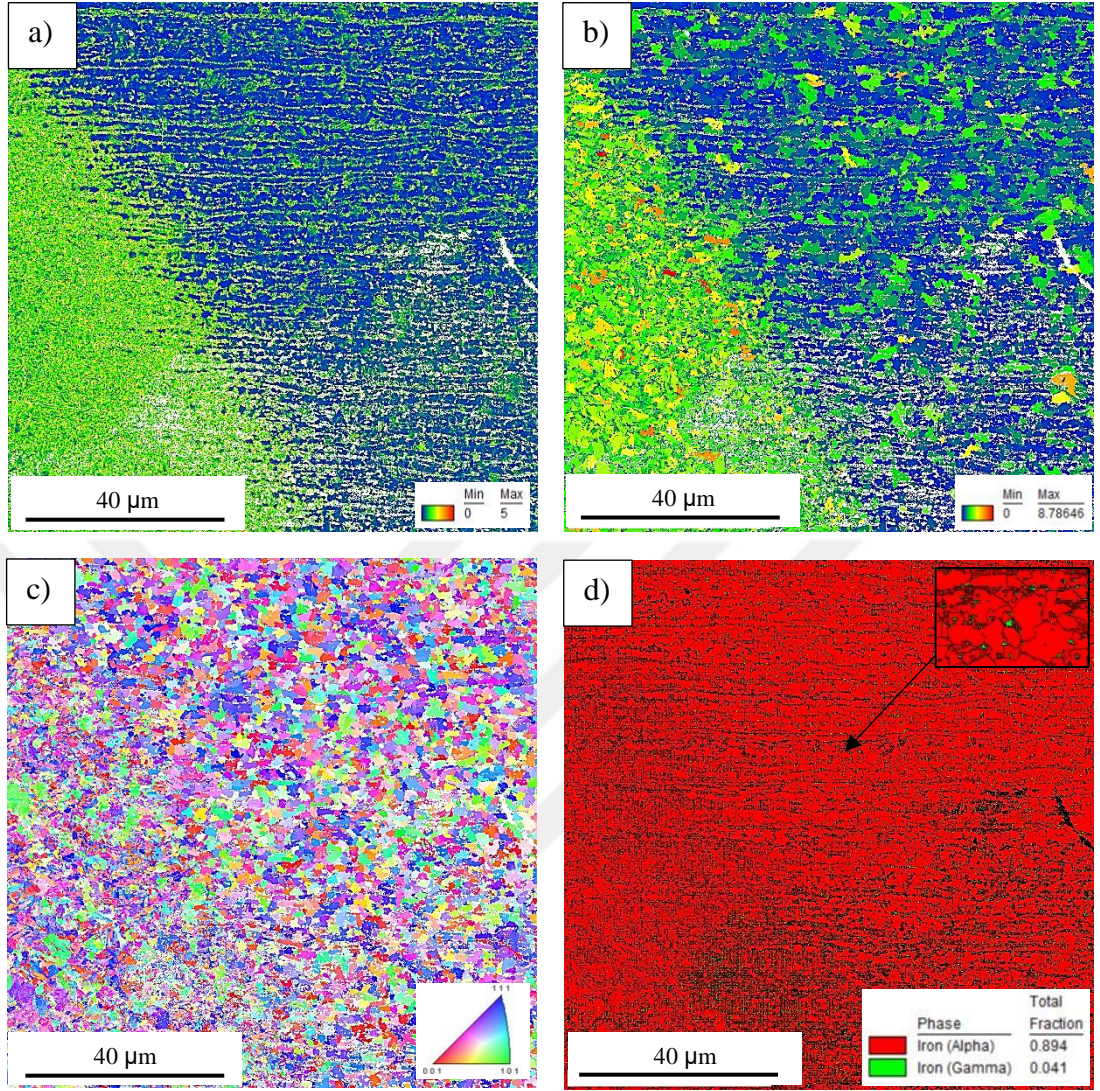
**Şekil 4.48.** Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, AK-ITAB ve e) BM SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit)



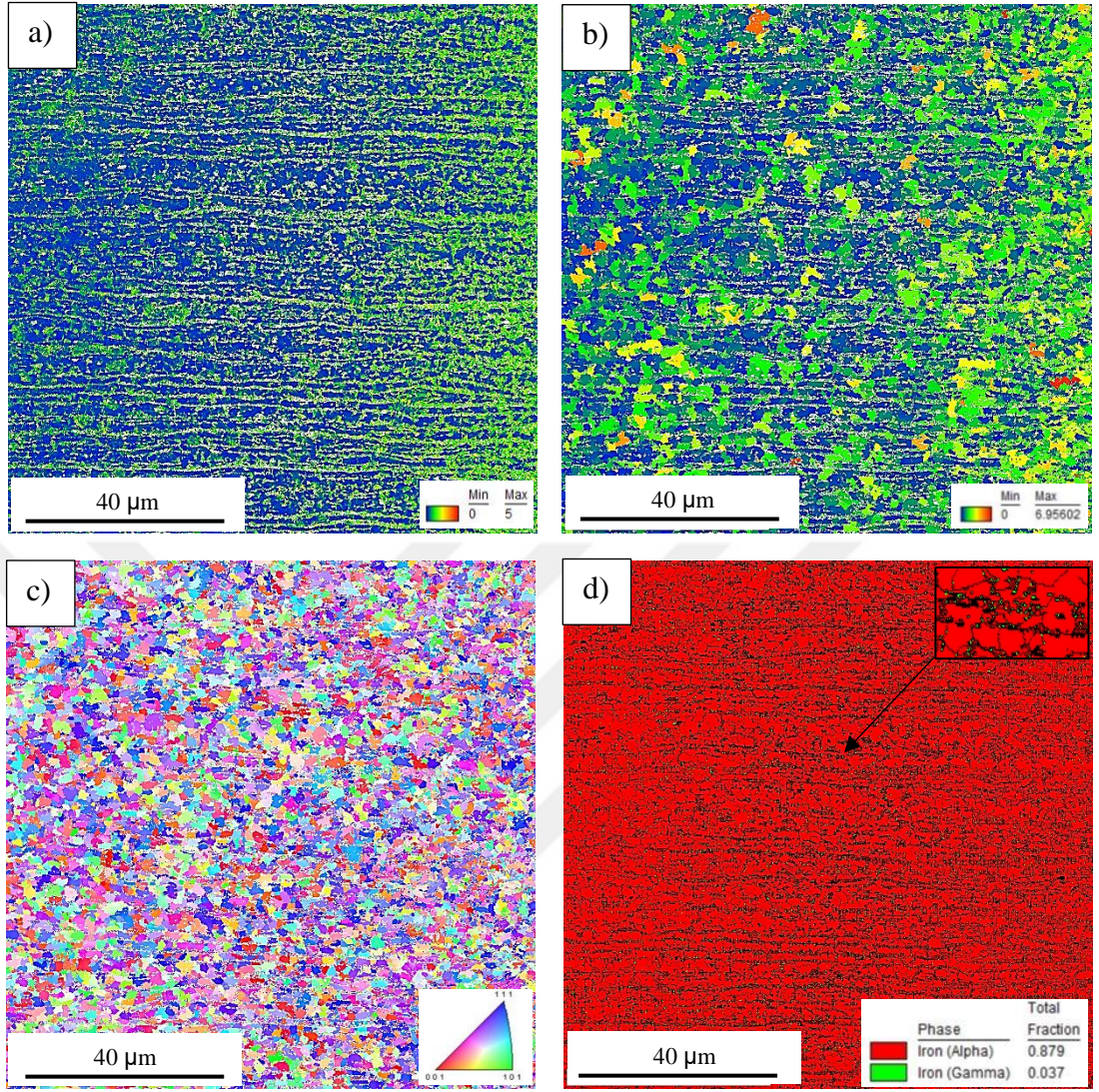
**Şekil 4.49.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit)

Fiber lazer kaynaklı DP800-DP800 numunelerde özellikle kaynak bölgesinden BM'ye geçişteki içyapı değişimini daha iyi anlayabilmek için en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numunede (17,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numunede (55 joule/mm) geçiş bölgesinde EBSD analizleri gerçekleştirilmiştir. 9 ve 1 kodlu numunelerim KAM haritası, GOS haritası, IPF haritası ve faz analizi haritaları Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de gösterilmiştir. KAM ve GOS haritalarında mavi renk ile ferrit bölgeleri

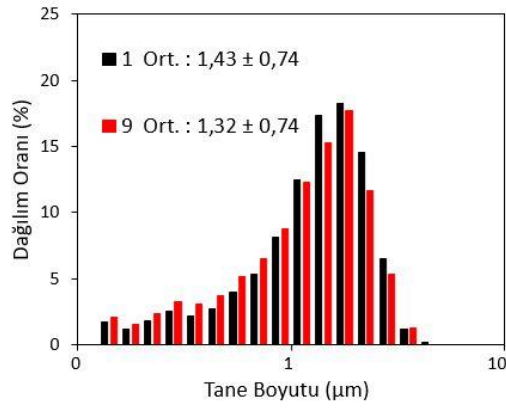
ve yeşil renk ile martenzit ve beynit bölgeleri gösterilmektedir. Ayrıca 1 ve 9 kodlu numunelerin KAM açısı dağılımı ve GOS açısı dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.52b,c'de verilmektedir. Isı girdisinin daha düşük olduğu 9 kodlu numunede 1 kodlu numuneye göre daha yüksek KAM ve GOS ortalamaları elde edilmiştir. 9 kodlu numunede ortalama KAM değeri 0,90 iken 1 kodlu numunede 0,68'dir. 9 kodlu numunede ortalama GOS değeri de (1,52) 1 kodlu numune ortalama GOS değerinden (1,22) yüksektir. Isı girdisinin düşük olduğu 9 kodlu numunede kaynak bölgesinden BM'ye geçişin keskin olduğu Şekil 4.50a-c'de görülmektedir. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numuneye ait haritalarda ise İK-ITAB ağırlıklı bir bölge görülmektedir (Şekil 4.51a-c). Isı girdisinin düşük olduğu 9 kodlu numuneye ait seçilen geçiş bölgesi KT-ITAB ve İT-ITAB'ları da yoğun olarak kapsadığı ve martenzitin yoğun olduğu bölgeleri kapsadığı için ortalama KAM ve GOS değerleri ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numuneye göre daha yüksek elde edilmiştir. Doğal olarak 9 kodlu numunede belirtilen bölgelerde yeniden kristallenme etkili olduğundan 9 kodlu numunenin ortalama tane boyutu (1,32  $\mu\text{m}$ ) da 1 kodlu numune ortalama tane boyutundan da (1,43  $\mu\text{m}$ ) düşüktür. 9 kodlu numunede tane boyutu 0,14  $\mu\text{m}$  ile 3,54  $\mu\text{m}$  arasında değişirken 1 kodlu numunede ortalama tane boyutu 0,14  $\mu\text{m}$  ile 4,46  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. 1 kodlu numune 9 kodlu numuneye göre daha büyük boyutlu tanelerin bulunduğu bölgeye sahip olduğundan dolayı 1 kodlu numunede ısı girdisinin daha fazla olmasının tane irileşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. 9 ve 1 kodlu numunelere ait IPF haritaları sırasıyla Şekil 4.50c ve Şekil 4.51c'de gösterilmiştir. 9 kodlu numuneye ait Şekil 4.50c'de gösterilen IPF haritasında ince tane yapısı net bir şekilde görülebilmektedir. Faz haritası sonuçları incelendiğinde ise ısı girdisinin düşük olduğu 9 kodlu numunede kalıntı ostenit oranı %4,1 ve ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede kalıntı ostenit oranı %3,7 olarak tespit edilmiştir. İki bölgenin ostenit miktarı arasında önemli bir fark yoktur. Isı girdisindeki artışla birlikte seçili bölgede kalıntı ostenit miktarı daha azdır. Faz haritalarında her iki numunede kaynak bölgesinden BM'ye doğru ostenitlerin irileştiği görülmüştür (Şekil 4.50d ve Şekil 4.51d).



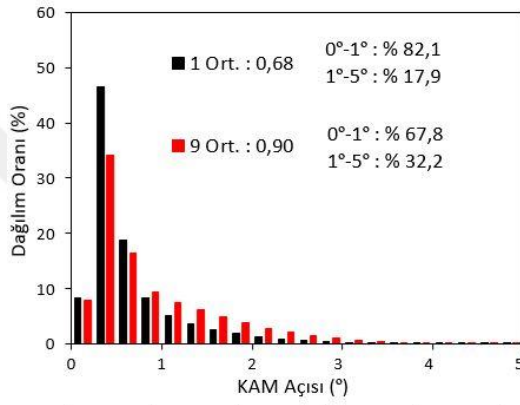
**Şekil 4.50.** Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



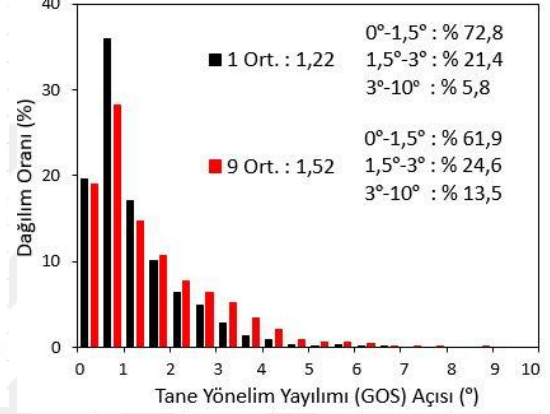
**Şekil 4.51.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



a)



b)



c)

**Şekil 4.52.** 1 kodlu (55 joule/mm) ve 9 kodlu (17,5 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı

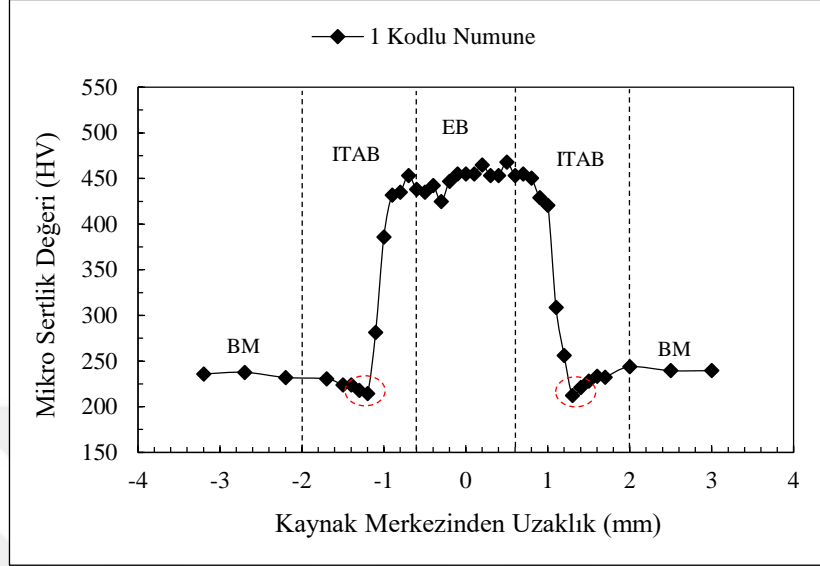
#### 4.2.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

Bu bölümde fiber lazer kaynağı ile DP800-DP800 kombinasyonunda birleştirilen numunelerin kaynak penetrasyon derinliğinin ortasında geçen yatay bir hat boyunca 0,1 mm aralıklarla ölçülen mikro sertlik sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır. Sertlik grafiklerinde EB, ITAB ve BM sınırları belirlenirken sertlik izi bırakılmış makro yapı fotoğraflarından da yararlanılmıştır.

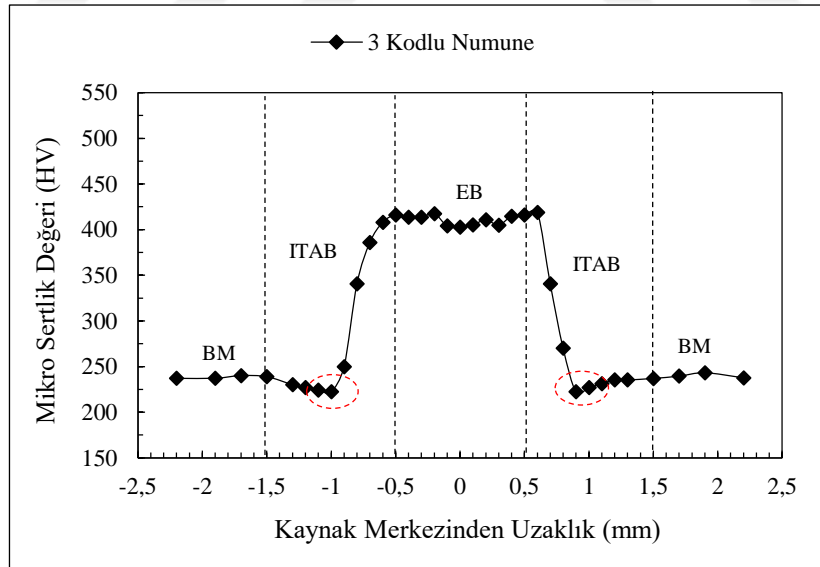
DP800-DP800 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde en yüksek fiber lazer gücü olan 2750 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) birleştirilen 1, 2 ve 3 kodlu numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu (50 mm/sn-55 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu (100 mm/sn-27,5 joule/mm) numunelere ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'te gösterilmiştir. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1,2 mm ve 1 mm'dir. Şekil 4.39'da makro yapı incelemelerinde 1 kodlu numunenin kaynak bölgesi EB kesit alanının da 3 kodlu numuneye göre belirgin olarak büyük olduğu (kaynak derinliği fazla olduğundan dolayı) görülmektedir. 1 kodlu numunenin EB'sinde ortalama sertlik değerleri 450 HV<sub>0,2</sub> iken 3 kodlu numunenin EB'sinde ortalama sertlik değerleri 411 HV<sub>0,2</sub>'dir. 1 kodlu numunede ısı girdisinin 3 kodlu numuneden yüksek olması EB mikro sertlik değerlerini arttırmıştır. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB mikro yapı incelemelerinde ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre daha etkin martenzit oluşumu görülmüştü (Şekil 4.40). 1 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (214,3 HV<sub>0,2</sub>) ve 3 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (222,3 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) oldukça düşük mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %5,4 iken 1 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %8,81 düşmüştür. Isı girdisinin fazla olması 1 kodlu numunede DP800 BM'de bulunan martenzitin daha fazla temperlenmesine ve poligonal ferrit oluşumunun artmasına sebep olmuştur. ITAB genişliği 1 kodlu numunede 1,4 mm iken 3 kodlu numunelerde 0,9 mm'dir. Ayrıca 1 kodlu numunenin de ITAB bölgesinde EB sınırında sertlik değerleri EB ile yakındır ve devamında BM bölgesine doğru keskin düşüş gözlenirken, 3 kodlu numunenin de ITAB EB sınırında sertlikte ani bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum 1 kodlu numunede 3 kodlu



numuneye göre daha geniş KT-ITAB ve İT-ITAB'a sahip olması ile ilgilidir. 3 kodlu numunede içyapıdaki martenzin oranı EB den uzaklaştıkça hızla azalmıştır.

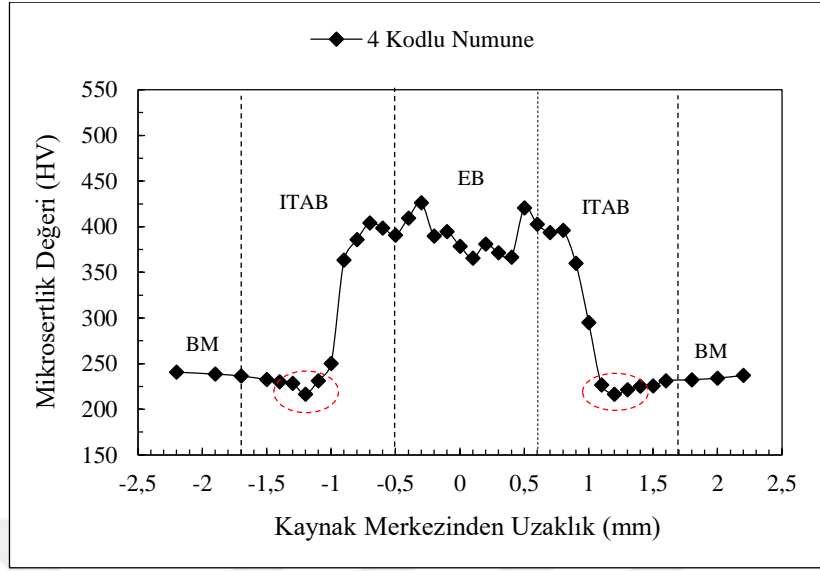


Şekil 4.53. 1 kodlu numune (2750 W, 50 mm/sn-55 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

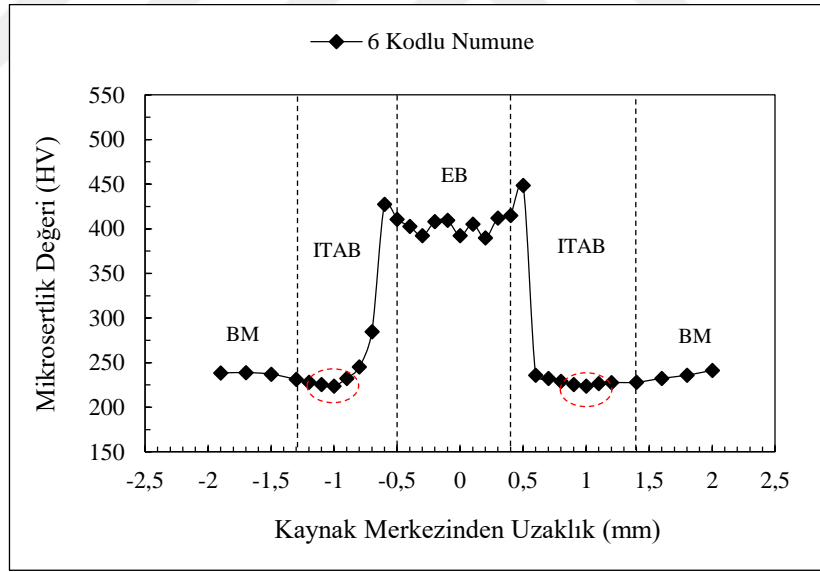


Şekil 4.54. 3 kodlu numune (2750 W, 100 mm/sn-27,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Şekil 4.55 ve Şekil 4.56’da fiber lazer kaynağı ile 2250 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) birleştirilen 4, 5 ve 6 kodlu numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (45 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numuneye ait (22,5 joule/mm) mikro sertlik ölçümleri gösterilmiştir. 4 ve 6 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1,1 mm ve 0,9 mm’dir. 4 kodlu numunenin EB’sinde ortalama 390 HV<sub>0,2</sub> ve 6 kodlu numunenin EB’sinde ise ortalama 401 HV<sub>0,2</sub> mikro sertlik değeri ölçülmüştür. Isı girdisinin düşmesi EB ortalama mikro sertlik değerlerini arttırmıştır. 4.40’ta ısı girdisindeki artışla EB tane boyutu artışı da görülmektedir. 4 kodlu numune AK-ITAB yumuşama bölgesinde (216,4 HV<sub>0,2</sub>) ve 6 kodlu numune AK-ITAB yumuşama bölgesinde (223,7 HV<sub>0,2</sub>) BM’den (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. 6 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM’ye göre mikro sertlik düşüşü %4,81 iken 4 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM’ye göre mikro sertlik %7,91 düşmüştür. ITAB genişliği ise 4 kodlu numunede 1,2 mm iken 6 kodlu numunede 0,8 mm’dir. Ayrıca 4 kodlu numunenin ITAB EB sınırında sertlik değerleri EB ile yakındır ve devamında BM’ye doğru keskin bir düşüş gözlenirken, 6 kodlu numunenin de ITAB EB sınırında sertlikte ani bir düşüş gözlenmiştir. 6 kodlu numunede KT-ITAB ve İT-ITAB’ın 4 kodlu numuneye göre çok daha dar olması ince taneli genel itibariyle martenzitik çok dar bir alanın EB sınırında oluşmasına neden olurken devamında ani mikro sertlik düşüşüne neden olmuştur.

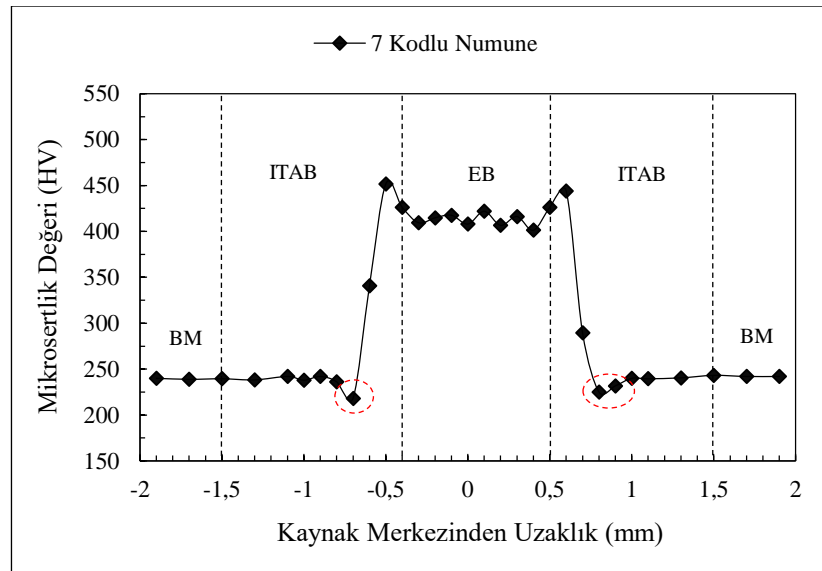


Şekil 4.55. 4 kodlu numune (2250 W, 50 mm/sn-45 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

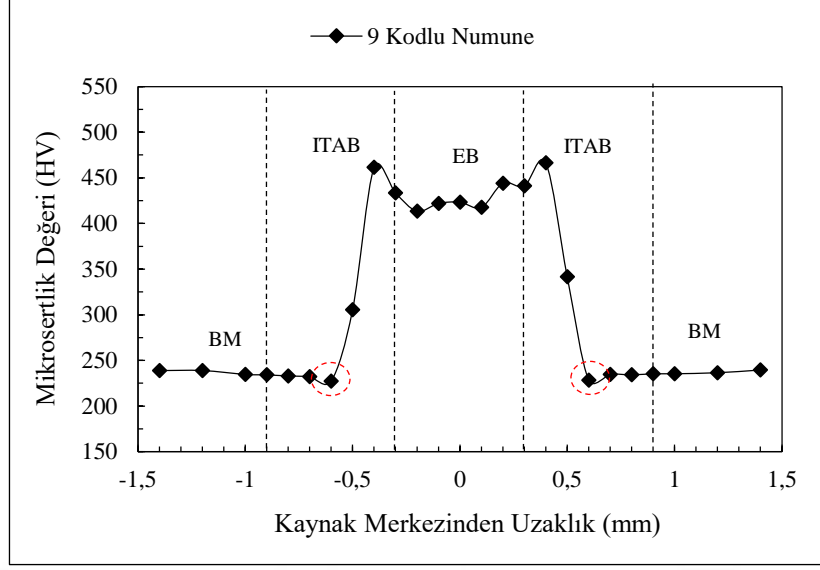


Şekil 4.56. 6 kodlu numune (2250 W, 100 mm/sn-22,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

En düşük lazer güç parametresi olan 1750 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında birleştirilen 7, 8 ve 9 kodlu numunelerden (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numune (35 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.57 ve Şekil 4.58'de gösterilmiştir. 7 ve 9 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 0,9 mm ve 0,6 mm'dir. Isı girdisindeki düşüşle EB genişliği düşmüştür. 7 ve 9 kodlu numunelerin EB ortalama mikro sertlik değerleri sırasıyla 412 HV<sub>0,2</sub> ve 424 HV<sub>0,2</sub>'dir. Isı girdisindeki düşüşle EB ortalama mikro sertlik değerleri artsa da çok fazla değişiklik göstermemiştir. 7 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesi olan AK-ITAB'da (218,2 HV<sub>0,2</sub>) ve 9 kodlu numune AK-ITAB yumuşama bölgesinde (227,2 HV<sub>0,2</sub>) BM mikro sertlik değerinden (235±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değeri ölçülmüştür. 9 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %3,32 iken 7 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %7,15 düşmüştür. ITAB genişliği 7 kodlu numunede ve 9 kodlu numunede sırasıyla 1 mm ve 0,6 mm'dir. ITAB genişliği ısı girdisindeki düşüşle birlikte düşmüştür. Ayrıca her iki numunede de EB ile ITAB sınır bölgesinde 0,1 mm genişliğindeki bölgede EB mikro sertlik değerlerinin üzerinde sertlik değerleri ölçülmüş (bu bölge ısı girdisindeki düşüşle beraber ince taneli martenzitik bir içyapıya sahip) ve BM'ye doğru gidildikçe ani mikro sertlik düşüşleri gerçekleşmiştir.

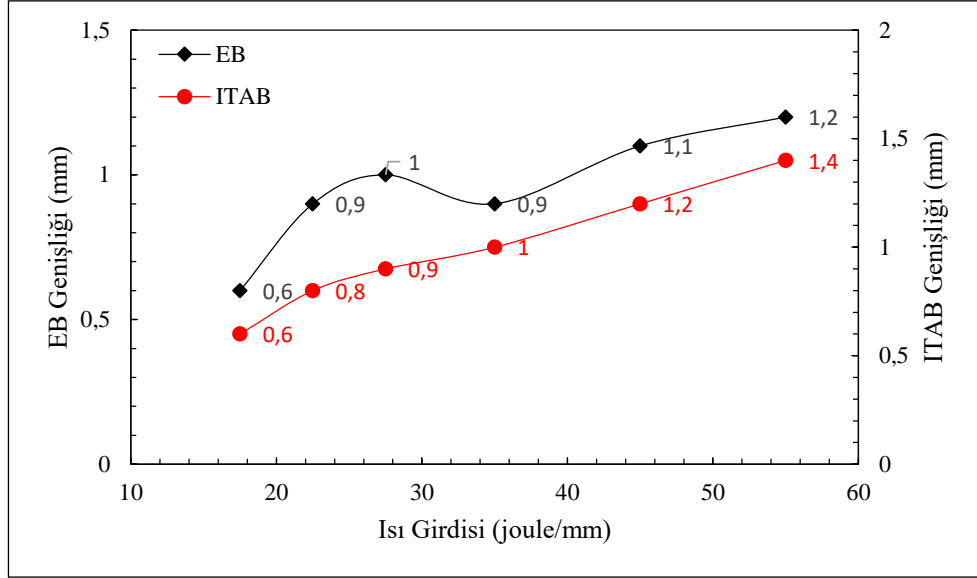


**Şekil 4.57.** 7 kodlu numune (1750 W, 50 mm/sn-35 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



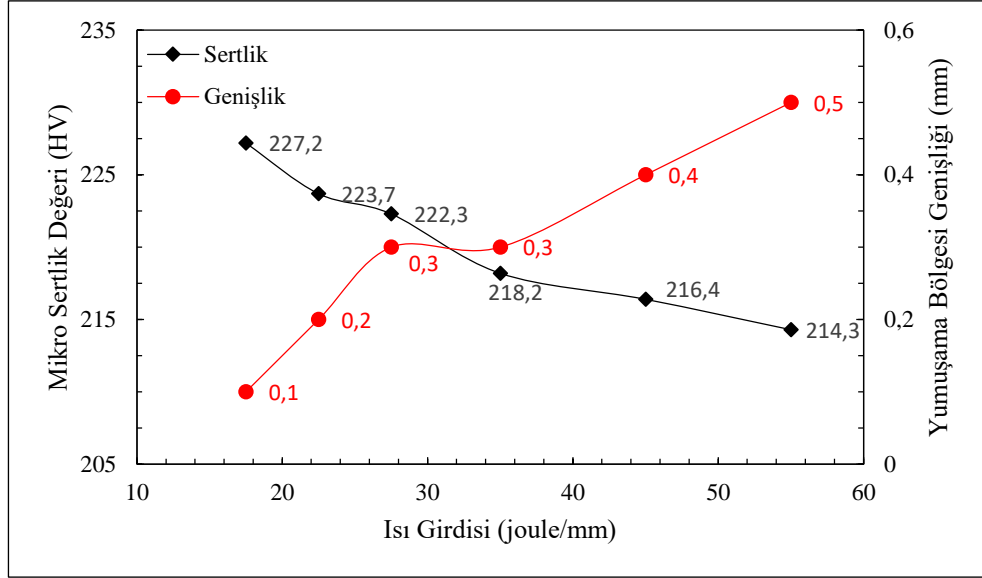
**Şekil 4.58.** 9 kodlu numune (1750 W, 100 mm/sn-17,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Mikro sertlik ölçümü sonucu ortaya çıkan EB ve ITAB genişliklerinin ısı girdisi ile değişimi Şekil 4.59’da gösterilmiştir. Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numunede (17,5 joule/mm) EB genişliği en düşük genişlik değeri olan 0,6 mm’dir. Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (55 joule/mm) ise EB genişliği en yüksek genişlik değeri olan 1,2 mm’dir. Isı girdisiyle EB genişliği artmıştır. ITAB genişliği ise ısı girdisiyle beraber lineere yakın bir şekilde artmıştır. Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numunede (17,5 joule/mm) ITAB genişliği 0,6 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede ITAB genişliği 1,4 mm’dir.



**Şekil 4.59.** Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi

Şekil 4.60'ta DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numunelerde farklı ısı girdileriyle ITAB yumuşama bölgelerinde ölçülen en düşük mikro sertlik değerleri ve ITAB yumuşama bölgesi genişlikleri gösterilmektedir. Isı girdisindeki artış ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri azalmaktadır. En düşük ITAB mikro sertlik değeri ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (55 joule/mm) 214,3 HV<sub>0,2</sub> ve BM'ye göre (235±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %8,81 düşüktür. Farklı parametrelerle birleştirilen numuneler içerisinde ölçülen en düşük ITAB yumuşama bölgesi sertliklerinden en yükseği ise ısı girdisinin en düşük olduğu (17,5 joule/mm) 9 kodlu numunede 227,2 HV<sub>0,2</sub> ve BM'ye göre (235±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %3,32 düşüktür. Isı girdisindeki artışla beraber AK-ITAB'da BM içyapısındaki martenzit daha fazla temperlenmiş ve aynı zamanda poligonal ferrit oranı da giderek artarak AK-ITAB yumuşama bölgesi sertliğinin BM'ye göre oldukça düşük olmasına neden olmuştur. ITAB yumuşama bölgeleri çok dar alanlarda oluşmakla birlikte ısı girdisindeki artışla beraber genişliği de artmaktadır. Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,1 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,5 mm'dir. 1 kodlu numunede yüksek ısı girdisi BM'nin temperlenmesiyle ferrit ve temperlenmiş martenzitten oluşan AK-ITAB yumuşama bölgesinin genişliğini oldukça arttırmıştır.



**Şekil 4.60.** Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi

### 4.2.3 Çekme Testleri

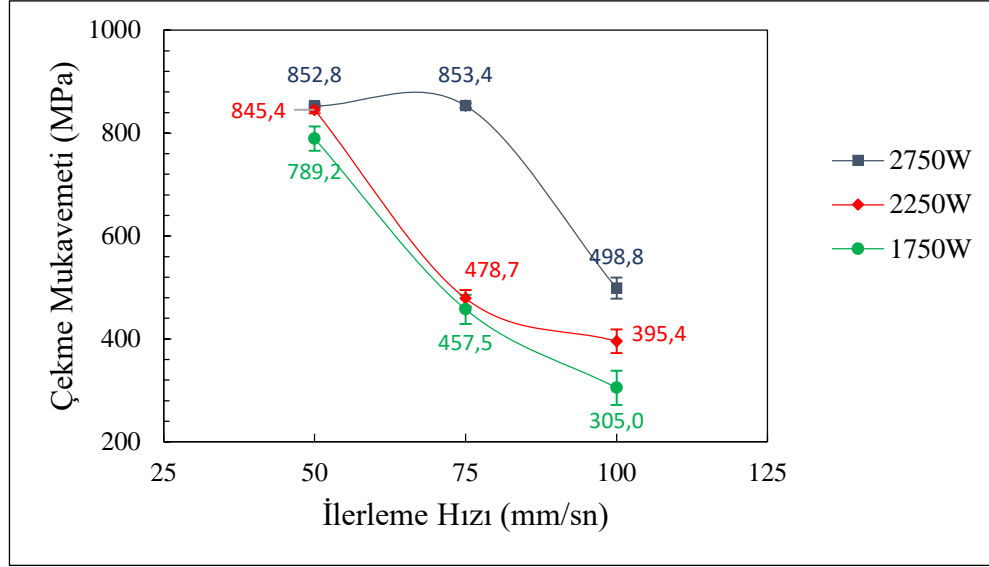
DP800-DP800 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile alın altına birleştirilen numunelerin çekme testi sonuçlarına ve çekme testinde kırılan numunelerin kırılma bölgelerine Çizelge 4.5'te yer verilmiştir. Çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerine ait standart sapma değerleri de Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Deneysel esnasında üç farklı lazer gücü (1750 W, 2250 W ve 2750 W) ve üç farklı ilerleme hızı (50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn) kullanılmış ve dokuz farklı parametrede kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kırılma bölgesi sonuçlarında bazı numunelerde kırılmanın KM'den ve bazılarında ise BM'den gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca farklı lazer güçlerinde ilerleme hızı ile çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimleri sırasıyla Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de gösterilmiştir. 1, 2 ve 4 kodlu numunelerde yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Bu numuneler genel itibariyle yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızı değerlerine sahip (yüksek ısı girdisine sahip) numunelerdir.

**Çizelge 4.5.** Farklı parametrelerle üretilen DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları

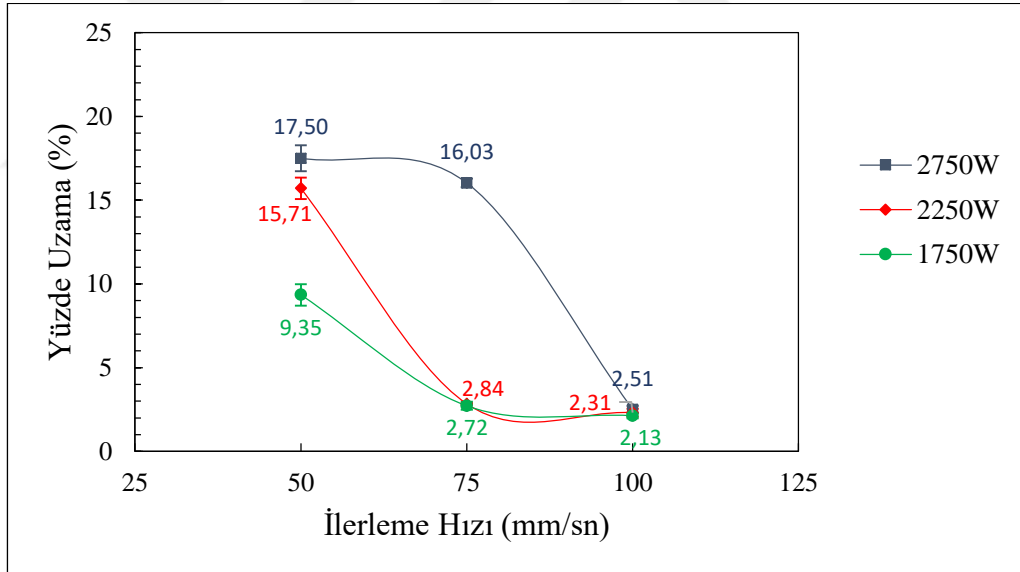
Numune Kodu	Isı Girdisi (Joule/mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Yüzde Uzama (%)	Standart Sapma	Kırılma Bölgesi
1	55	852,8	4	17,5	0,78	BM
2	36,7	853,4	4,1	16,03	0,26	BM
3	27,5	498,8	20,6	2,51	0,20	KM
4	45	845,4	7,1	15,71	0,65	BM
5	30	478,7	16,3	2,84	0,06	KM
6	22,5	395,4	23,1	2,31	0,24	KM
7	35	789,2	23,6	9,35	0,64	KM
8	23,3	457,5	28,3	2,72	0,24	KM
9	17,5	305	33,2	2,13	0,15	KM



Farklı lazer güçlerinde birleştirilen DP800-DP800 fiber kaynaklı numunelerde ilerleme hızıyla çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'de gösterilmiştir. 2750 W lazer gücüne sahip 1, 2 ve 3 kodlu numunelerden 50 mm/sn ve 75 mm/sn ilerleme hızlarına sahip 1 ve 2 kodlu numunelerde yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerine ulaşılmıştır. 1 ve 2 kodlu numuneler için çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 852,8 MPa ve 853,4 MPa ve yüzde uzama değerleri sırasıyla %17,5 ve %16,03'tür. 3 kodlu 100 mm/sn ilerleme hızına sahip numunede 498,8 MPa çekme mukavemeti ve %2,51 uzama gibi düşük değerler test edilmiştir. 2750 W lazer gücü için kaynak ilerleme hızının 75 mm/sn'den 100 mm/sn'ye yükseltilmesi çekme mukavemetini ve özellikle de yüzde uzama değerini önemli ölçüde azaltmıştır. 2250 W lazer gücü değeri için ilerleme hızının 50 mm/sn'den 100 mm/sn'ye 25 mm/sn aralıklarla yükseltildiği 4, 5 ve 6 kodlu numunelerde ilerleme hızındaki artışla birlikte çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri azalmıştır. En yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri 4 kodlu numunede 2250 W lazer gücü ve 50 mm/sn ilerleme hızında sırasıyla 845,4 MPa ve %15,71'dir. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri ise 6 kodlu numunede 2250 W lazer gücü 50 mm/sn ilerleme hızında sırasıyla 395,4 MPa ve %2,31 olarak test edilmiştir. 2250 W lazer gücü için ilerleme hızı 50 mm/sn'den 100 mm/sn'ye yükseltildiğinde çekme mukavemeti ve yüzde uzama sırasıyla %53,2 ve %85,3 azalmıştır. 1750 W lazer gücü için 50 mm/sn, 75 mm/sn ve 100 mm/sn ilerleme hızlı numuneler sırasıyla 7, 8 ve 9 kodlu numunelerdir. 1750 W lazer gücünde en yüksek çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya 50 mm/sn ilerleme hızına sahip 7 kodlu numunede 789,2 MPa ve %9,35 olarak ulaşılmıştır. En düşük çekme mukavemetine ve yüzde uzama değerine ise 9 kodlu numunede 305 MPa ve %2,13 olarak ulaşılmıştır. 1750 W lazer gücünde ilerleme hızının 50 mm/sn'den 100 mm/sn'ye arttırılmasıyla çekme mukavemeti %61,4 ve yüzde uzama ise %77,2 azalmıştır. Tüm numuneler içerisinde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri 1 kodlu numunede 2750 W lazer gücü ve 50 mm/sn ilerleme hızında 852,8 MPa ve %17,5'tir. Lazer gücünün 1750 W ile en düşük ve ilerleme hızının 100 mm/sn ile en yüksek olduğu 9 kodlu numunede ise tüm numuneler içerisinde en düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri sırasıyla 305 MPa ve %2,13'tür.



**Şekil 4.61.** 1750 W, 2250 W ve 2750 W güç değerlerinde çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi



**Şekil 4.62.** 1750 W, 2250 W ve 2750 W güç değerlerinde yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi

Kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7). ANOVA sonucunda çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %69,72 ve %58,13 ile en çok etki eden parametre ilerleme hızı olmuştur. Lazer gücünün çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkisi sırasıyla %19,30 ve %22,74'tür. Çekme mukavemetinde kalan hata payı %10,99 iken yüzde uzamada %19,13'tür.

**Çizelge 4.6.** Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

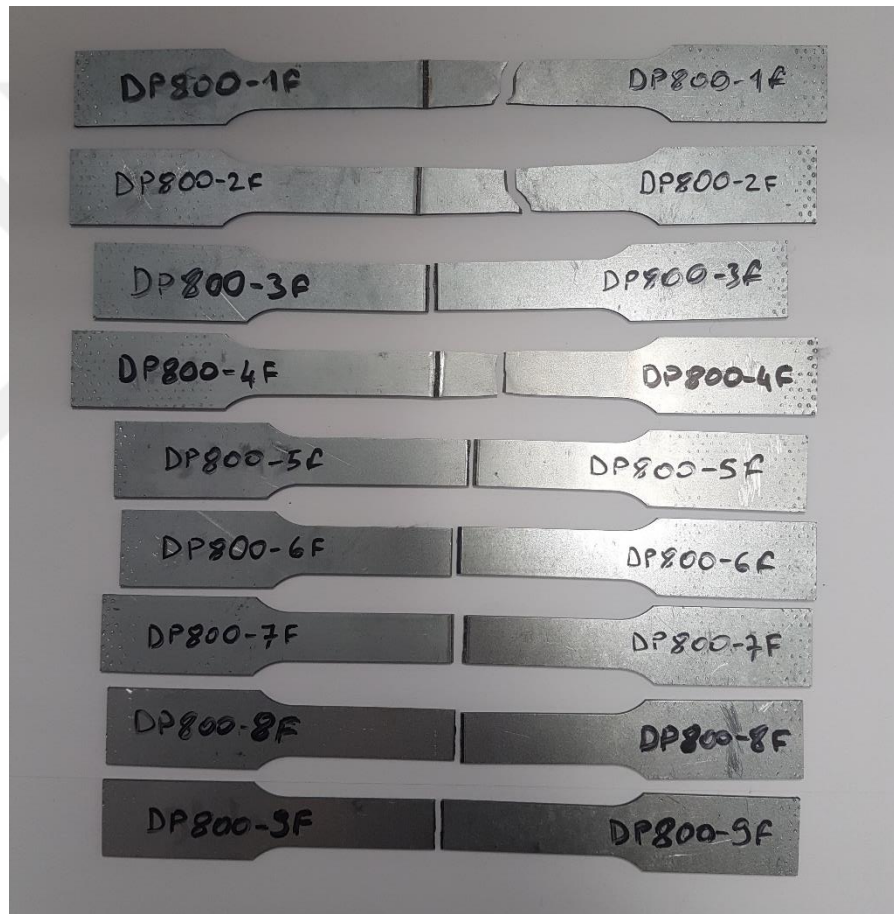
Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	2	76741	38370	3,51	0,132	19,30
İlerleme Hızı	2	272217	138609	12,69	0,019	69,72
Kalan Hata	4	43681	10920			10,99
Toplam	8					100

**Çizelge 4.7.** Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	2	83,53	41,77	2,38	0,209	22,74
İlerleme Hızı	2	213,57	106,79	6,08	0,061	58,13
Kalan Hata	4	70,28	17,57			19,13
Toplam	8					100

#### 4.2.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

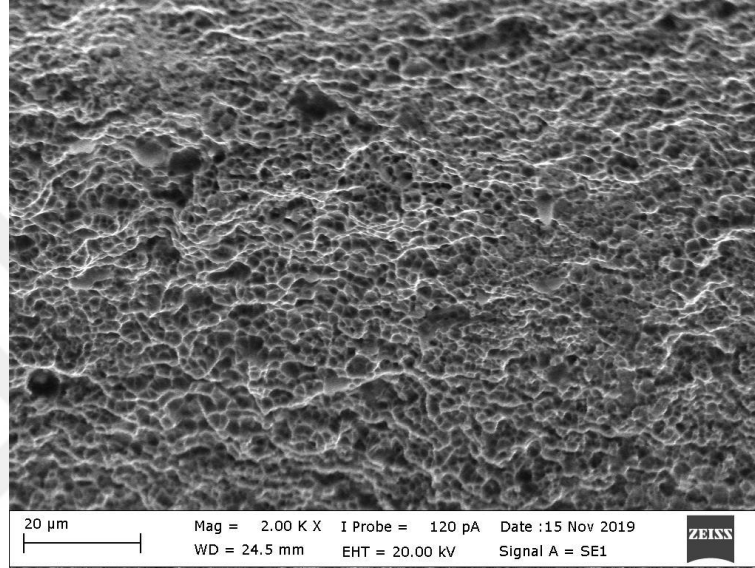
DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonrası kırılma görüntüleri incelendiğinde ısı girdisinin yüksek olduğu 1, 2 ve 4 kodlu numunelerin BM'den kırıldığı 3, 5, 6, 7, 8 ve 9 kodlu numunelerin ise KM'den kırıldığı görülmüştür (Şekil 4.63). Fiber lazer kaynağı ile birleştirilen DP800 saclarda birleştirme genel itibariyle kaliteli bir şekilde yapılmıştır. Özellikle 1, 2 ve 4 kodlu numunelerdeki kırılmanın BM'den gerçekleşmesi bunun bir göstergesidir.



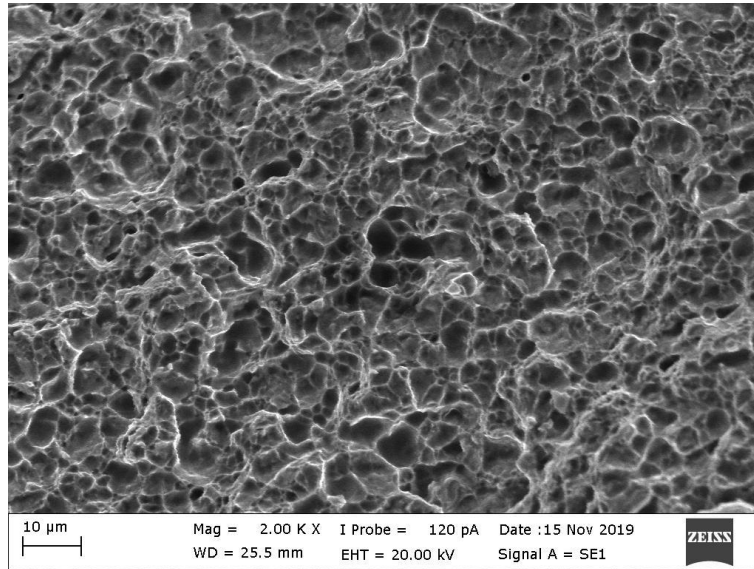
**Şekil 4.63.** Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler

Şekil 4.64a ve Şekil 4.64b'de DP800-DP800 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde sırasıyla en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri gösterilmiştir. 9 kodlu numune KM'den 1 kodlu numune ise

BM'den kırılmıştı. 9 kodlu numunede kaynak kökünde birleşmenin sağlanamaması kaynak kökünde gerilme yığılması oluşturarak 9 kodlu numunenin gevrek bir şekilde kırılmasına neden olmuştur. 9 kodlu numunede küçük ve sığ çukurcuklar oluşurken 1 kodlu numunede büyük ve derin çukurcuklar oluşmuştur. 9 kodlu numunedeki küçük ve sığ çukurcuklar gevrek kırılmanın belirtisidir (Şekil 4.64a). 1 kodlu numunedeki daha büyük boyutlu ve derin çukurcuklar ise sünek kırılmaya işaret etmektedir (Şekil 4.64b).



a)



b)

**Şekil 4.64.** DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı a) 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve b) 1 kodlu numuneye (55 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

### 4.3 DP1000-DP1000 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler

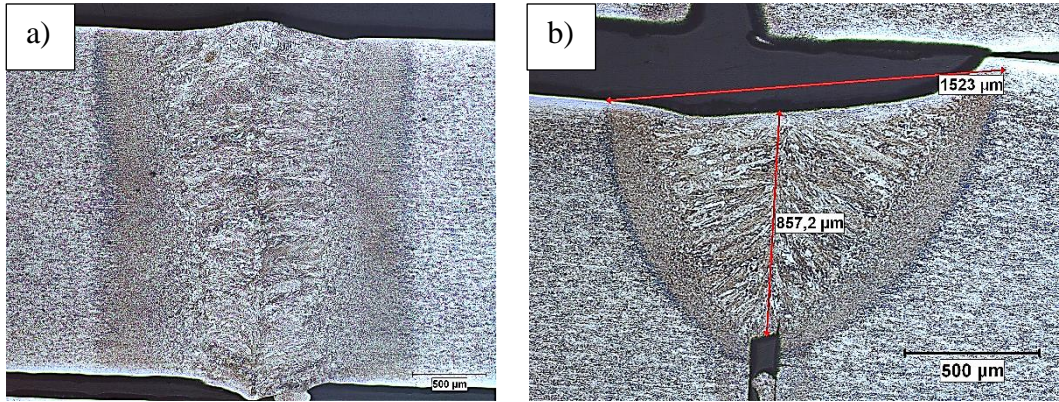
Bu bölümde 2,5 mm kalınlığındaki DP1000 saclar fiber lazer kaynağı ile farklı lazer güç ve ilerleme hızı parametrelerinde (Çizelge 3.5) alın altına birleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin makro yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

#### 4.3.1 İçyapı İncelemeleri

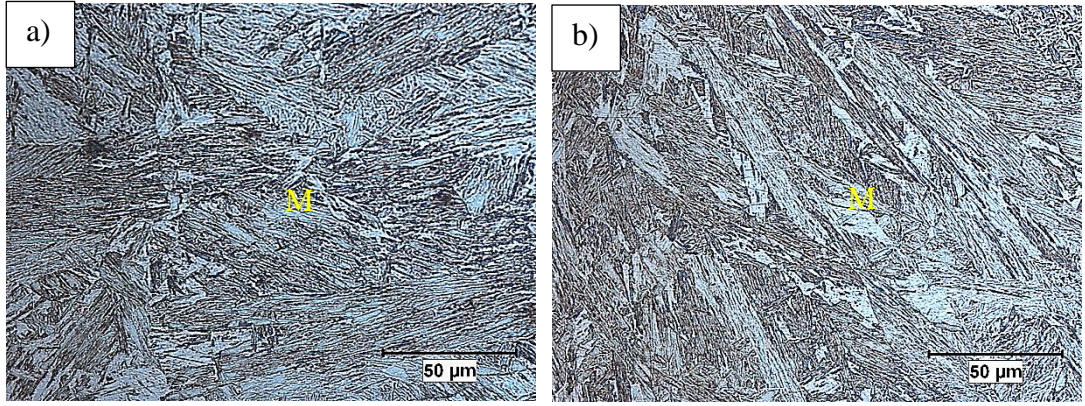
İki farklı fiber lazer kaynak gücünde (2200W, 3000W) ve üç farklı kaynak ilerleme hızında (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn) birleştirilen 2,5 mm kalınlığındaki DP1000-DP1000 sacların 2200W ve 3000W kaynak güçlerinde en yüksek ve en düşük ısı girdilerine sahip kaynaklı numunelerinin makro yapı ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Makro yapı görüntülerinden kaynak penetrasyon derinliği ölçümleri de yapılmıştır. EB ve ITAB mikro yapı görüntüleri alınmıştır. ITAB a, b, c ve d ile gösterilen dört farklı bölüme ayrılmıştır. BM'ye yakın a ile gösterilen bölüm A<sub>3</sub> sıcaklığının üzerinde oluşan KT-ITAB'ı ifade etmektedir. ITAB'da b ile gösterilen kısım yine A<sub>3</sub> sıcaklığının üzerinde oluşan İT-ITAB'ı tarif etmektedir. BM'ye yakın tarafta koyu siyahlığın olduğu ince kısım İK-ITAB olup c ile gösterilmiştir. İK-ITAB'da kaynak sırasında ısı girdisinin neden olduğu sıcaklık A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> sıcaklıkları arasına kadar yükselmektedir. İK-ITAB ile BM arasında kaynak sıcaklığının A<sub>1</sub>'in altında kaldığı AK-ITAB ise d ile gösterilmiştir.

Şekil 4.65-Şekil 4.67 arasında 2200 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında birleştirilen (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn) numunelerden ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numune (25 mm/sn-88 joule/mm) ile ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (75 mm/sn-29,3 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. 1 kodlu numunenin ısı girdisi 3 kodlu numunenin ısı girdisinin üç katıdır. Şekil 4.65a ve Şekil 4.65b'de 1 ve 3 kodlu numunelerin kaynak bölgesi makro yapı fotoğrafları verilmiştir. 1 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme gerçekleşirken 3 kodlu numunede ısı girdisinin yetersiz kalmasından dolayı kaynak penetrasyon derinliği 857,2 µm'de kalmış ve kaynak kökünde

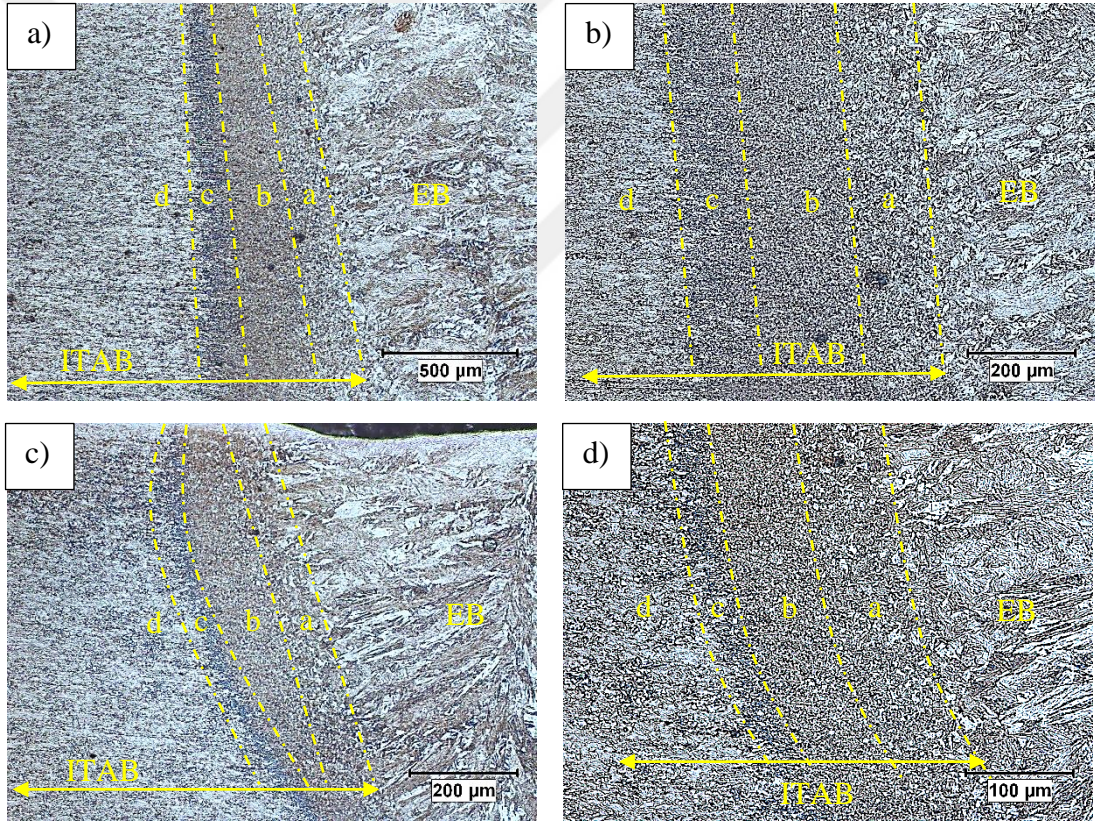
birleşmemiştir. Şekil 4.66a ve Şekil 4.66b’de sırasıyla 1 ve 3 kodlu numunelerin EB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Her iki numune de EB’de genel itibariyle martenzitten oluşan içyapıyalar vardır. Fakat ısı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede 1 kodlu numuneye göre EB’de daha etkin martenzit oluşumu görülmektedir (Şekil 4.66). 1 ve 3 kodlu numunelerin ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları ise Şekil 4.67’de gösterilmiştir. Aynı zamanda KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB bölgeleri Şekil 4.67’de işaretlenmiştir. 1 ve 3 kodlu numunelerin KT-ITAB’ları karşılaştırıldığında daha yüksek ısıya daha uzun süre maruz kalan 1 kodlu numunede daha iri taneler oluşmuştur (Şekil 4.67b,d). Ayrıca 1 kodlu numunede ısı girdisinin yüksek olmasının sonucu 3 kodlu numuneye göre daha geniş bir ITAB oluşmuştur. 1 kodlu numunenin 3 kodlu numuneye göre KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB’ları daha geniştir. Burada dikkat çekici bir diğer husus, daha önceki bölümlerde DP800 fiber ve Nd:YAG lazer kaynağında ITAB görüntülerinde İK-ITAB çok belirgin değilken DP1000 çeliğinde bu bölgenin çok daha belirgin olmasıdır. Bu durumun DP1000’in DP800’den daha fazla martenzit içermesi sonucu  $A_1$ - $A_3$  sıcaklıkları arasında çökelen karbürlerle alakalı olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.65.** a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn-88 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (2200 W, 75 mm/sn-29,3 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



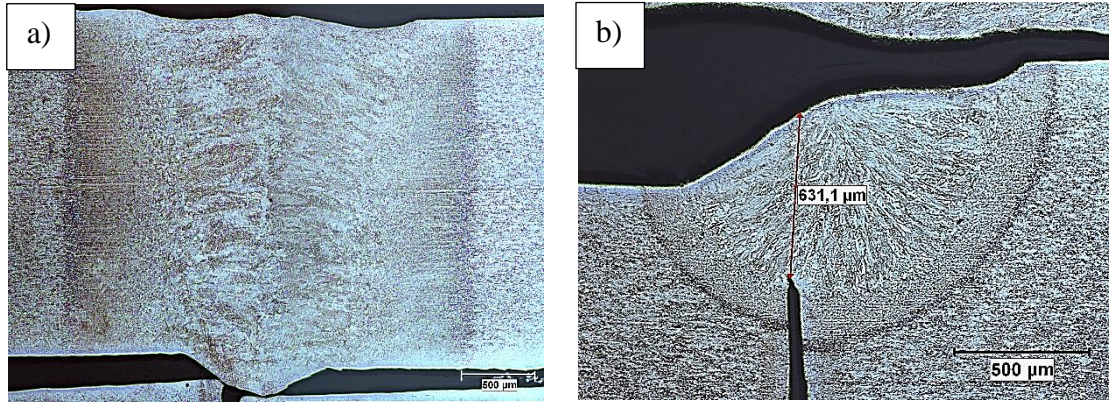
**Şekil 4.66.** a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (2200 W, 75 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



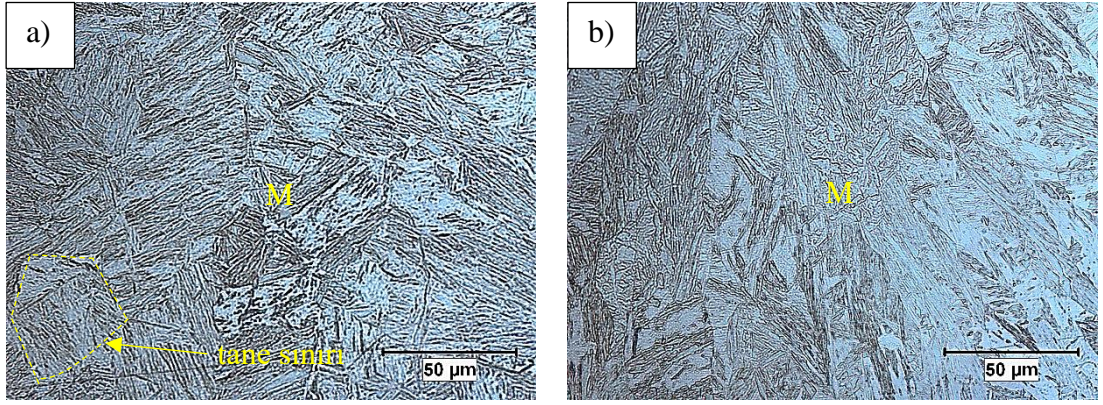
**Şekil 4.67.** a) 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (2200 W, 75 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri



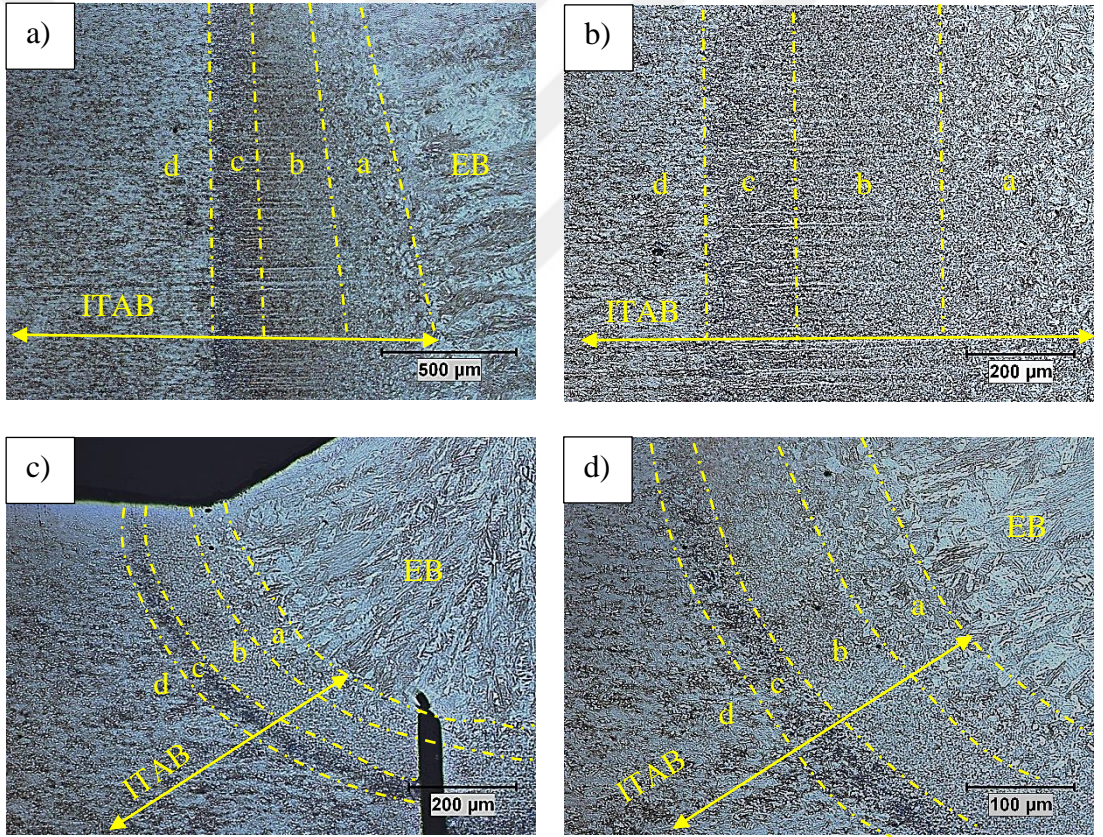
3000 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında birleştirilen (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn) DP1000-DP1000 kombinasyonundaki numunelerden ısı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numune (25 mm/sn-120 joule/mm) ile ısı girdisinin en düşük olduğu 6 kodlu numuneye (75 mm/sn-40 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.68-Şekil 4.70'te gösterilmiştir. 4 kodlu numunede ısı girdisi 6 kodlu numunenin üç katı ve tüm numuneler içerisinde en yüksektir. Şekil 4.68'de 4 ve 6 kodlu numunelerin kaynak bölgesi makro yapı fotoğraflarında 4 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme gerçekleşirken 6 kodlu numunede kaynak derinliğinin (631,1  $\mu\text{m}$ ) kaynak kökünde birleşmeye yetecek seviyede olmadığı görülmektedir. 4 ve 6 kodlu numunelerin EB mikro yapı fotoğrafları ise sırasıyla Şekil 4.69a ve Şekil 4.69b'de gösterilmiştir. Her iki numune de genel itibariyle martenzitten oluşan içyapıya sahip ve 6 kodlu numunenin EB'sinde 4 kodlu numuneye göre daha ince lamelli martenzit oluşmuştur. 4 ve 6 kodlu numunelere ait ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları ise Şekil 4.70'te gösterilmiştir. 4 kodlu numune 6 kodlu numunenin üç katı ısı girdisine sahip olduğu için çok daha geniş bir ITAB'a sahiptir. Ayrıca DP1000-DP1000 fiber lazer kaynaklı numuneler içerisinde en yüksek ısı girdisine sahip olan 4 kodlu numune en geniş ITAB'a da sahiptir (Şekil 4.70a,b).



**Şekil 4.68.** a) 4 kodlu (3000 W, 25 mm/sn-120 joule/mm) ve b) 6 kodlu (3000 W, 75 mm/sn-40 joule/mm) numunelere ait makro yapı görüntüleri



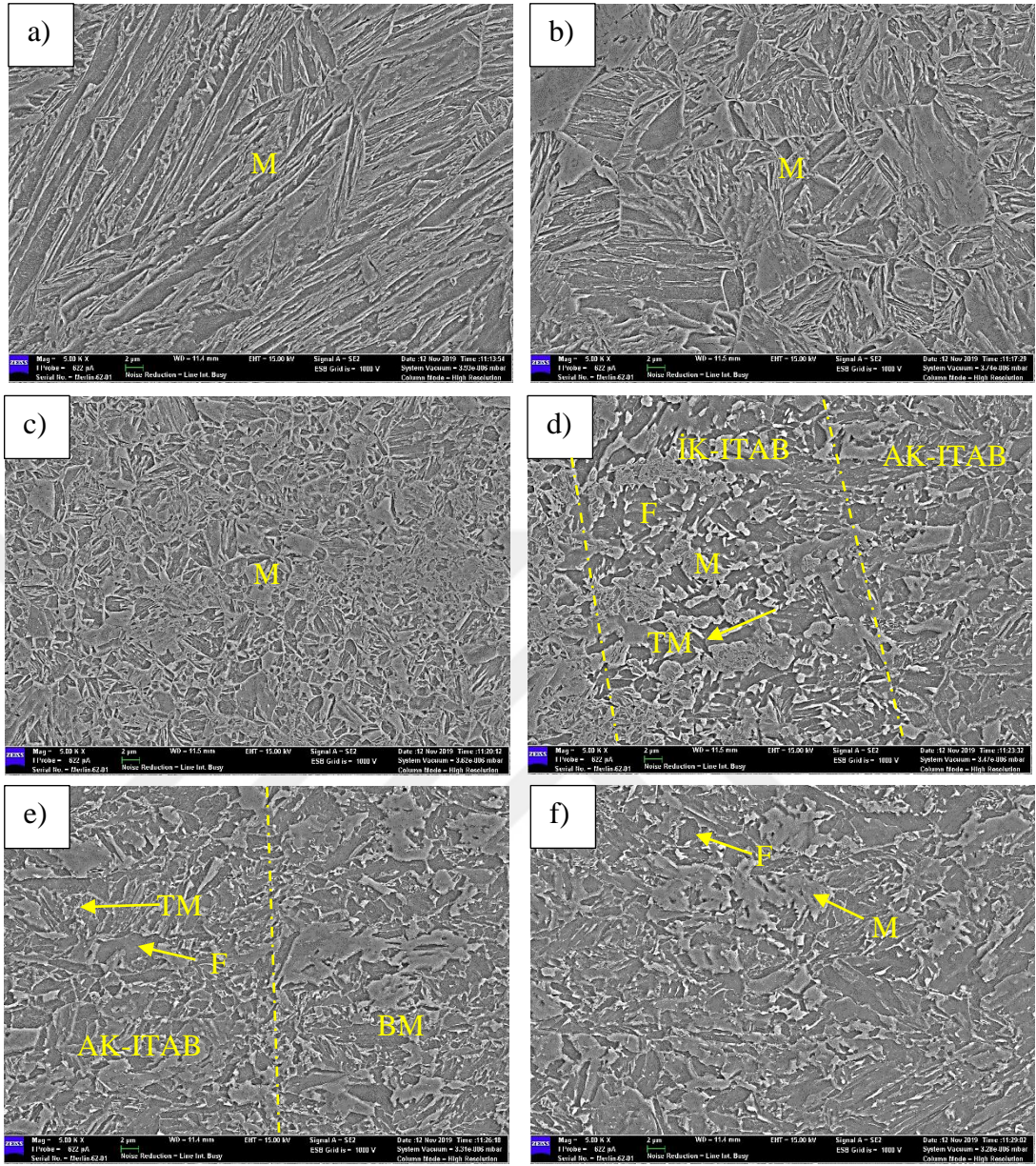
**Şekil 4.69.** a) 4 kodlu (3000 W, 25 mm/sn) ve b) 6 kodlu numunelere (3000 W, 75 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



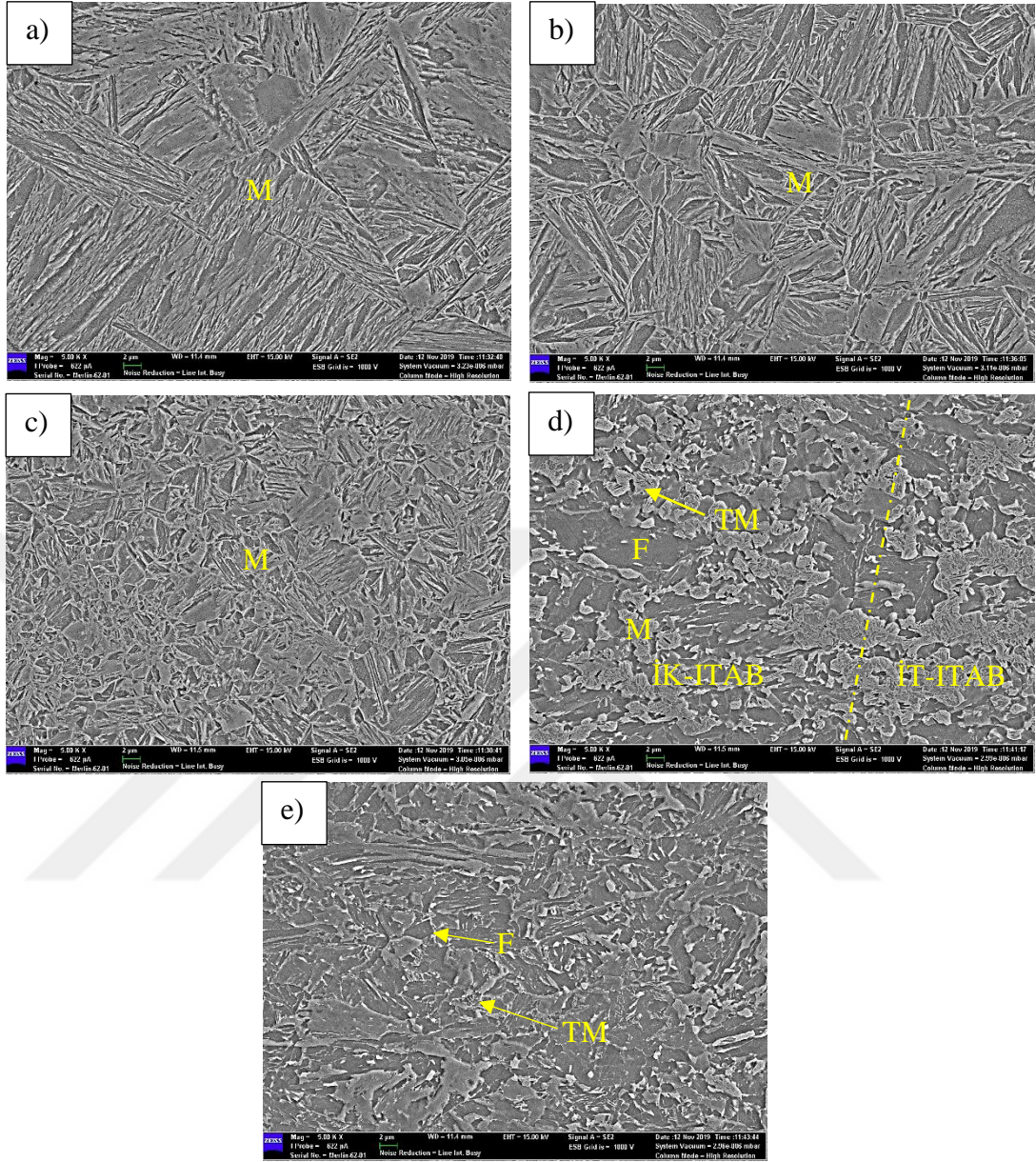
**Şekil 4.70.** a) 4 kodlu numune (3000 W, 25 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (3000 W, 75 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

DP1000-DP1000 kombinasyonunda fiber lazer kaynağıyla birleştirilen numuneler içerisinde sırasıyla en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (29,3 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait optik mikroskop görüntülerinde Şekil 4.67c ve Şekil 4.70a'da işaretlenen EB, KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB, AK-ITAB ve BM SEM görüntüleri Şekil 4.71 ve Şekil 4.72'de gösterilmiştir. 3 ve 4 kodlu numunelerin EB'si genel itibariyle martenzitten oluşan içyapıya sahiptir (Şekil 4.71a ve Şekil 4.72a). 3 ve 4 kodlu numunelerin EB'sinde etkin çubuk şeklinde martenzit oluşumu görülmüştür (Şekil 4.71a ve Şekil 4.72a). 3 ve 4 kodlu numunelerin KT-ITAB görüntüleri karşılaştırıldığında ısı girdisinin düşük olduğu ve bu bölgenin dar olduğu 3 kodlu numunede yeniden kristallenme etkili olmaya başladığı ve çubuk şeklindeki martenzit yapısının değiştiği, 4 kodlu numunede ise yüksek ısı girdisinin etkisiyle tane irileşmesinin olduğu görülmüştür (Şekil 4.71b ve Şekil 4.72b). 3 kodlu numunenin İT-ITAB'ı 4 kodlu numunenin İT-ITAB'ından daha ince tanelidir (Şekil 4.71c ve Şekil 4.72c). 3 kodlu numunede dar bir İK-ITAB oluşurken 4 kodlu numunede yüksek ısı girdisinin etkisiyle İK-ITAB genişliği artmıştır. Ayrıca 4 kodlu numune A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> arasındaki sıcaklığa 3 kodlu numuneye göre daha fazla maruz kaldığından içyapısındaki ferrit taneleri irileşmiştir. Temperlenmiş martenzit oluşumu da 4 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre daha şiddetlidir (Şekil 4.71d ve Şekil 4.72d). A<sub>1</sub> sıcaklığının altında kalan AK-ITAB'lar incelendiğinde 4 kodlu numune 3 kodlu numuneye göre ısı girdisine daha fazla maruz kalındığından dolayı daha fazla temperlenmiş martenzit oluşmuş ve ferrit taneleri oldukça irileşmiştir (Şekil 4.71e ve Şekil 4.72e). DP 1000 çeliğinin ferrit ve martenzitten oluşan BM yapısı Şekil 4.71f'de gösterilmiştir. DP1000'in BM SEM görüntüsü Şekil 4.48e'de gösterilen DP800'e ait BM SEM görüntüsüyle karşılaştırıldığında DP1000'de DP800'e göre daha etkin martenzit oluşumu söz konusudur. Huan ve ark. (2019) farklı martenzit oranlarına sahip (DP590, DP780 ve DP980) 1,5 mm kalınlığında çelik sacları benzer türlerde fiber lazer kaynağı ile alın altına birleştirip lazer kaynak bölgesindeki özellik değişimini ve şekillendirilebilirliğe olan etkilerini incelemişlerdir. Üç farklı kaynaktan da EB, KT-ITAB ve İT-ITAB'da genel itibariyle martenzit içyapısından dolayı yüksek sertliğe sahip bölgelerin varlığı söz konusudur. İT-ITAB'da ferrit'te tespit edilmiştir. Bu bölgelerde mikro sertlik değerleri BM'nin 1,2-1,9 katı aralığında değişmiştir. Ayrıca İK-ITAB bölgelerinin mikro yapısı genel itibariyle ferrit, martenzit ve ince taneli ferritten oluşmaktadır. DP780-DP780 ve

DP980-DP980 birleřtirmelerde ITAB yumuřama bölgesinde BM'den daha dűřük sertlik deęerleri elde edilmesine raęmen bu durum DP600 birleřtirme için geçerli olmamıřtır. İK-ITAB ile BM arasında oluřan AK-ITAB SEM gűrűntűleri de incelendięinde DP780-DP780 ve DP980-DP980'de bu bűlgede yumuřamaya sebep olan temperlenmiř martenzit oluřurken, DP600 de BM içyapısına benzer ferrit ve martenzitten oluřan bir içyapı vardır. Ayrıca DP780-DP780 ve DP980-DP980 AK-ITAB bűlgeleri kıyaslandıęında DP980'de DP780'e gűre daha fazla temperlenmiř martenzit oluřmuřtur. Farabi ve ark. (2011) 1,2 mm kalınlıęındaki DP600 ve DP980 sacları diode lazer kaynaęı ile birleřtirmiřlerdir. alıřmalarında her iki tarafın ITAB'ında martenzit, ferrit, temperlenmiř martenzit ve olası beynit içyapılarını tespit etmiřlerdir. Yapılan alıřmalar ve bu tez çalıřmasında elde edilen ait kaynak bűlgesi mikro yapı gűrűntűleri birbirlerini destekler niteliktedir.



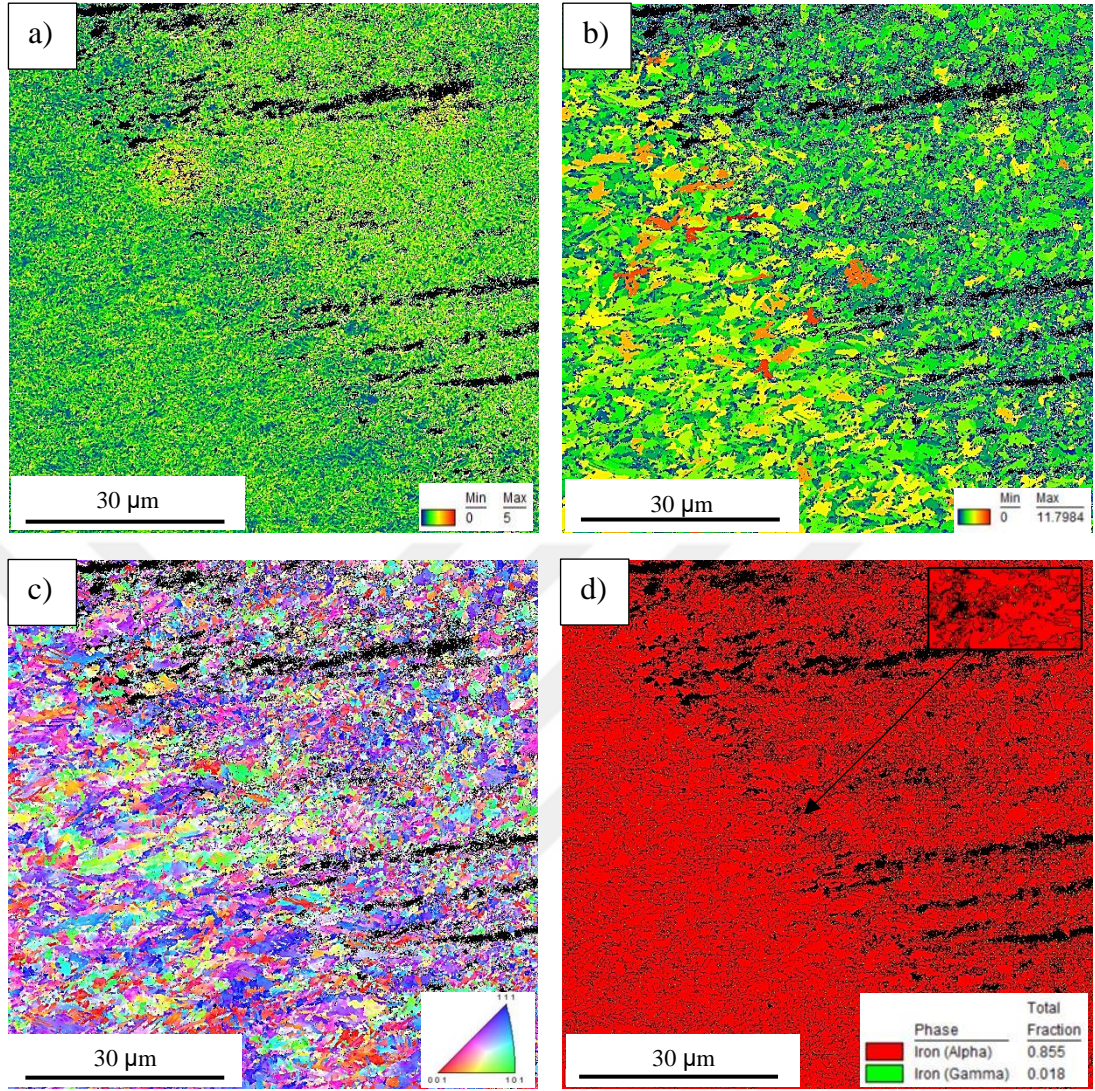
**Şekil 4.71.** Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (29,3 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit)



**Şekil 4.72.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M:Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F:Ferrit)

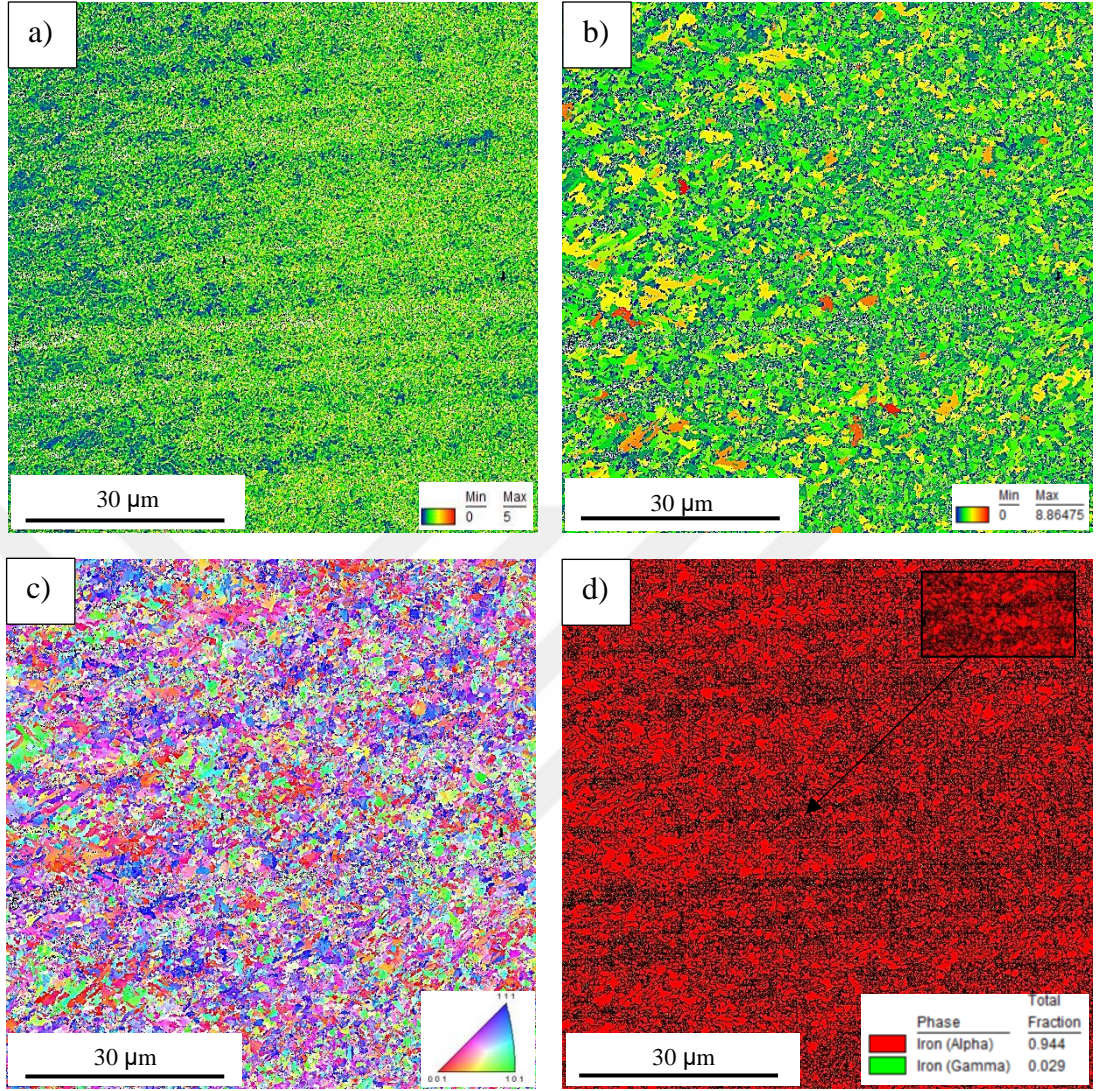
DP1000-DP1000 fiber lazer kaynaklı numunelerde yoğun olarak İT-ITAB ve İK-ITAB'ı kapsayan geçiş bölgesinden EBSD incelemeleri yapılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek adına tüm kaynaklı numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (29,3 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (120 joule/mm) seçilerek incelenmiştir. İlk olarak lokal deformasyonların ve ikinci fazların tespitinde

kullanılan KAM haritaları 3 ve 4 kodlu numuneler için sırasıyla Şekil 4.73a ve Şekil 4.74a'da gösterilmiştir. KAM açısı dağılımları da karşılaştırmalı olarak Şekil 4.75b'de verilmiştir. 3 ve 4 kodlu numunelerin KAM haritalarında yeşil ve sarı ağırlıklı bölgeler martenzit ve beynit bölgelerini gösterirken mavi ağırlıklı kısım ferrit ağırlıklı bölgeleri göstermektedir. Ortalama KAM değeri ise 3 kodlu numunede 1,33 iken 4 kodlu numunede 1,32'dir. KAM ortalamaları arasında önemli bir fark yoktur. 3 ve 4 kodlu numunelere ait GOS haritaları ve GOS dağılımları ise sırasıyla Şekil 4.73b, Şekil 4.74b ve Şekil 4.75c'de verilmektedir. Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunenin GOS ortalaması 3,21 iken 4 kodlu numunenin GOS ortalaması 2,33'tür. Özellikle 1,5° ve altı GOS değerleri yeniden kristallenin içyapıyı ifade etmektedir. 4 kodlu numunenin gerek daha düşük GOS ortalamasına sahip olması gerekse 1,5°nin altında (%30,9) 3 kodlu numuneye göre (%17,6) daha fazla orana sahip olması 4 kodlu numunede yeniden kristallenmenin seçili bölgelerde daha şiddetli gerçekleştiğini göstermektedir. 4 kodlu numunenin 3 kodlu numuneye göre ince tane yapısı IPF haritalarında da görülmektedir (Şekil 4.73c ve Şekil 4.74c). Ayrıca tane boyutu ölçüm sonuçları da bu sonucu desteklemektedir (Şekil 4.75a). Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede ortalama tane boyutu 1,20 µm iken ısı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunede ortalama tane boyutu 0,79 µm'dir. 3 kodlu numunede tane boyutu 0,14 µm ila 7,08 µm arasında değişirken 4 kodlu numunede tane boyutu 0,14 µm ila 3,55 µm arasında değişmektedir. 3 kodlu numunede ısı girdisi düşük ve BM'ye geçiş daha keskin olduğundan dolayı büyük boyutlu taneler saptanabilmiştir. 4 kodlu numunede seçili bölge yüksek oranda İT-ITAB'da yer almıştır. Ayrıca 4 kodlu numune de 80µm x 80µm'lik taralı alan da BM'ye geçiş için yeterli değildir. 3 ve 4 kodlu numunelere ait faz haritaları ise sırasıyla Şekil 4.73d ve Şekil 4.74d'de gösterilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %1,8 iken 4 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %2,9'dur. Isı girdisindeki artış İK-ITAB genişliğini arttırmış ve 4 kodlu numunede daha yüksek oranda kalıntı ostenit tespit edilmiştir.

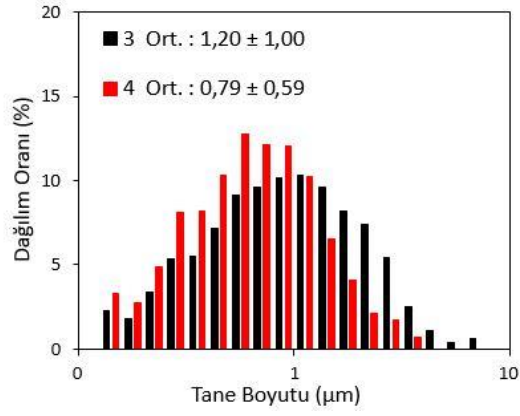


**Şekil 4.73.** Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (29,3 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası

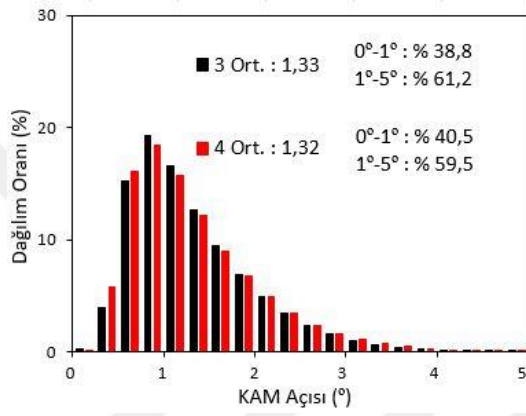




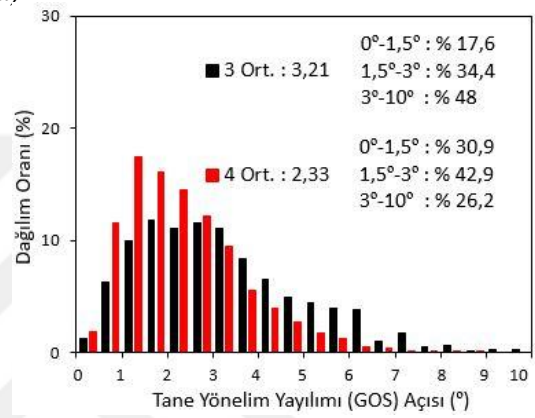
**Şekil 4.74.** Isı girdisinin en düşük olduğu 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



a)



b)



c)

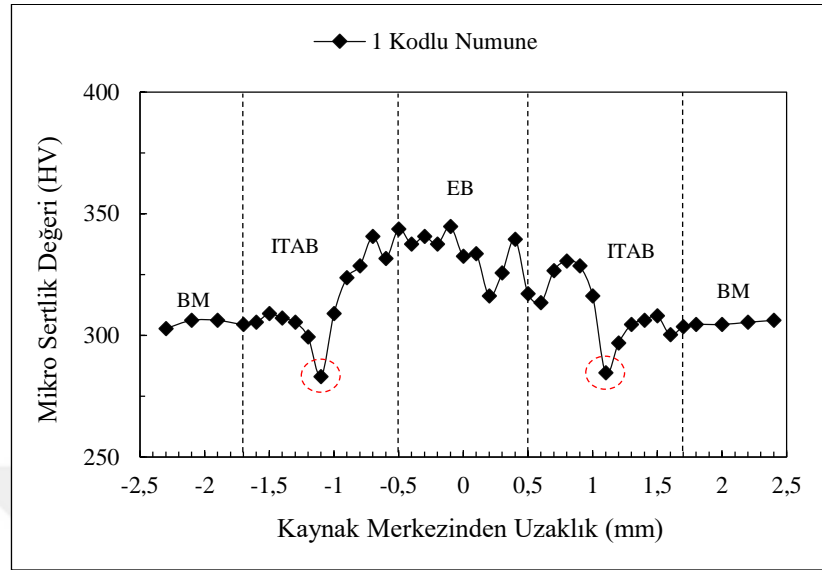
**Şekil 4.75.** 3 kodlu (29,3 joule/mm) ve 4 kodlu (120 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı

### 4.3.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

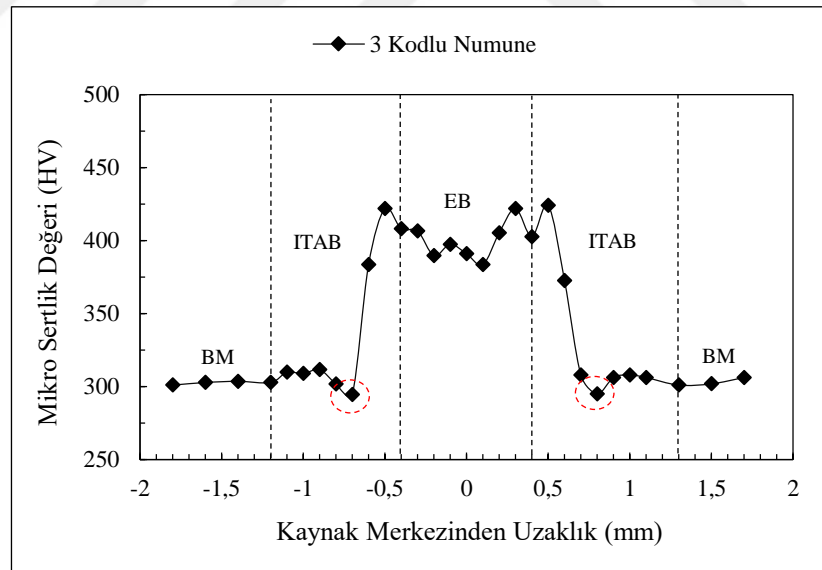
Bu bölümde fiber lazer kaynağı ile DP1000-DP1000 kombinasyonunda birleştirilen numunelerin kaynak penetrasyon derinliğinin ortasında geçen yatay bir hat boyunca 0,1 mm aralıklarla ölçülen mikro sertlik sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de fiber lazer kaynağı ile 2200 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn ) DP1000-DP1000 kombinasyonunda birleştirilen 1, 2 ve 3 kodlu numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (25 mm/sn-88 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (75 mm/sn-29,3 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. EB, ITAB ve BM sınırları sertlik grafikleri üzerinde belirlenirken sertlik izi bırakılmış makro yapı fotoğraflarından da yararlanılmıştır. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB genişlikleri sertlik grafikleri üzerinden sırasıyla 1 mm ve 0,8 mm olarak ölçülmüştür. 1 kodlu numunenin EB ortalama mikro sertlik değeri (334 HV<sub>0,2</sub>) 3 kodlu numunenin ortalama mikro sertlik değerinden (399 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük çıkmıştır. Şekil 4.65'te görüldüğü gibi 3 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme gerçekleşmemiş ve daha küçük hacimsel kaynak bölgesi daha hızlı soğuyarak daha sert martenzitik yapıların oluşmasına neden olmuştur. Isı girdisinin de düşük olmasının sonucunda 3 kodlu numune EB'sinde 1 kodlu numunenin EB'sine göre daha ince lamelli martenzit çubuklarının oluşması daha yüksek ortalama sertlik değerlerinin ölçülmesinin nedenidir (Şekil 4.66). 1 kodlu numune ITAB (283 HV<sub>0,2</sub>) ve 3 kodlu numune ITAB'ın (294,6 HV<sub>0,2</sub>) yumuşama bölgesi olan AK-ITAB'da BM sertlik değerinden (310±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %4,97 iken 1 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %8,71 düşüktür. ITAB genişliği 1 kodlu numunede 1,2 mm ve 3 kodlu numunede 0,8 mm'dir. Isı girdisinin azalması kaynak bölgesi genişliğini de azaltmıştır. Özellikle ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede (88 joule/mm) EB'ye yakın ITAB'da yüksek sertlik değerlerinden oluşan 0,4 mm genişliğinde bir bölge oluşurken ısı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede (29,3 joule/mm) bu bölgenin genişliği 0,2 mm ile sınırlı kalmıştır. Bu bölgeler KT-ITAB ve İT-ITAB'ı kapsamaktadır. Devamında (BM yönünde) sıcaklığın düşmesiyle

birlikte martenzit oranında azalma ve her iki numunedeki de sertlikte ani düşüşler mevcuttur.

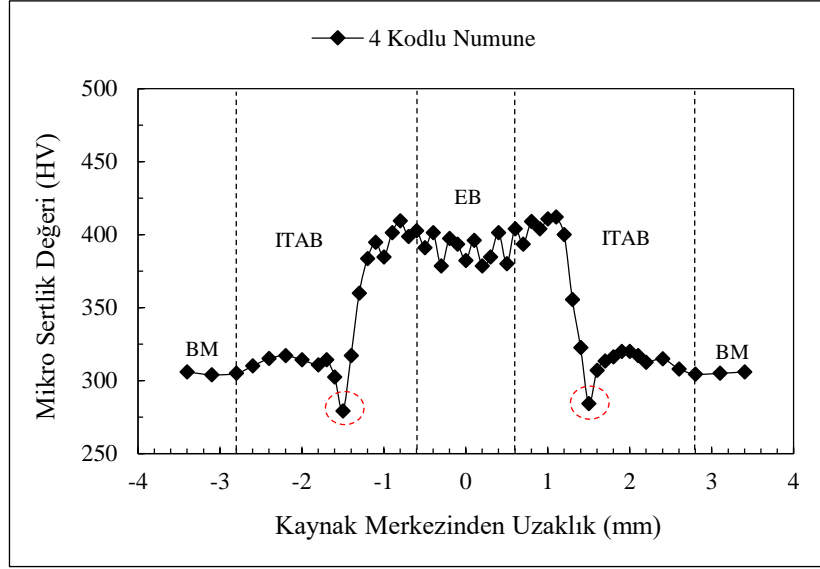


Şekil 4.76. 1 kodlu numune (2200 W, 25 mm/sn-88 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

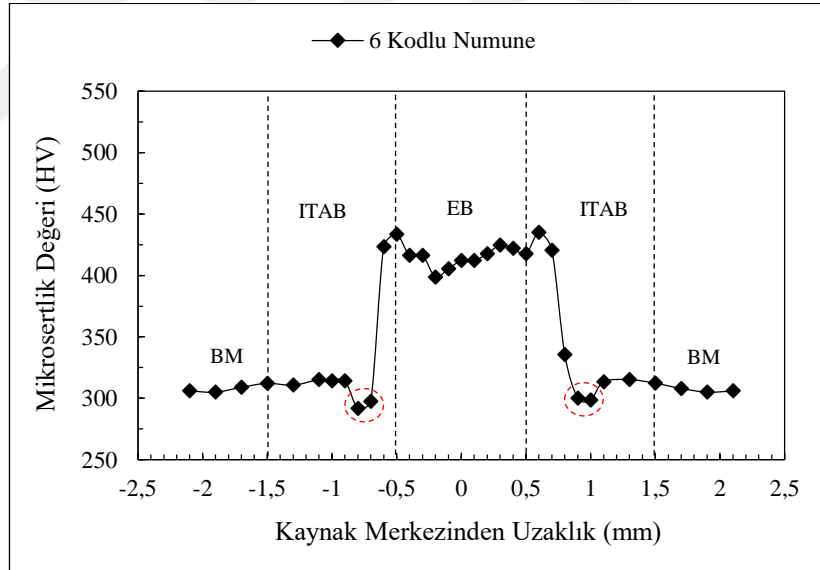


Şekil 4.77. 3 kodlu numune (2200 W, 75 mm/sn-29,3 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Fiber lazer ile 3000 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn) DP1000-DP1000 kombinasyonunda birleştirilen 4, 5 ve 6 kodlu numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (120 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numuneye (40 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.78 ve Şekil 4.79'da gösterilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 6 kodlu numunede EB genişliği 1 mm iken ısı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunede EB genişliği 1,2 mm'dir. 4 kodlu numunenin EB ortalama mikro sertlik değeri (390 HV<sub>0,2</sub>) 6 kodlu numunenin ortalama mikro sertlik değerinden (414 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük çıkmıştır. 4 kodlu numunenin EB'si yüksek sıcaklığa maruz kaldığından dolayı gerçekleşen tane irileşmesi 6 kodlu numunenin EB'sine göre daha düşük sertlik değerlerinin ölçülmesine neden olmuştur (Şekil 4.59). 4 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (279,3 HV<sub>0,2</sub>) ve 6 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde (291,8 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (310±5 HV<sub>0,2</sub>) daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 6 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %5,87 iken 4 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %9,9 düşüktür. 4 kodlu numunede yüksek ısı girdisi AK-ITAB'da daha fazla martenzitin temperlenmesine ve daha fazla poligonal ferrit oluşumuna neden olarak tüm numuneler içerisinde en düşük sertlik değerinin ölçülmesine neden olmuştur. ITAB genişliği 4 kodlu numunede 2,2 mm ve 6 kodlu numunede 1 mm'dir. 4 kodlu numunedeki yüksek ısı girdisi ITAB genişliğinin artışında çok etkili olmuştur. Özellikle ısı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunede (120 joule/mm) EB'ye yakın ITAB'da yüksek sertlik değerlerinden oluşan 0,6 mm genişliğinde bir bölge oluşurken ısı girdisinin düşük olduğu 6 kodlu numunede (40 joule/mm) bu bölgenin genişliği 0,15 mm ile sınırlıdır. Bu bölgeler KT-ITAB ve İT-ITAB bölgeleridir. Devamında (BM'ye doğru) her iki numunede de içyapıdaki martenzit oranının düşmesiyle birlikte sertlikte ani düşüşler görülmüştür.



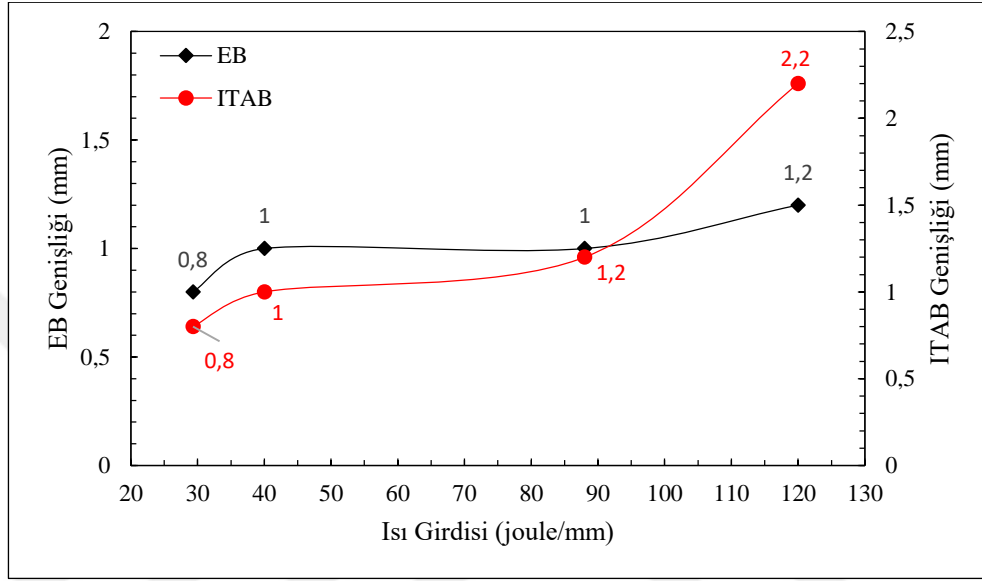
**Şekil 4.78.** 4 kodlu numune (3000 W, 25 mm/sn-120 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



**Şekil 4.79.** 6 kodlu numune (3000 W, 75 mm/sn-40 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Mikro sertlik ölçümleri sonucu ortaya çıkan EB ve ITAB genişliklerinin ısı girdisi ile değişimi Şekil 4.80'de gösterilmiştir. Isı girdisindeki artış ile EB genişliği ve ITAB genişliği artmıştır. En düşük EB genişliği tüm numuneler içerisinde ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (29,3 joule/mm) 0,8 mm iken en yüksek EB genişliği ısı

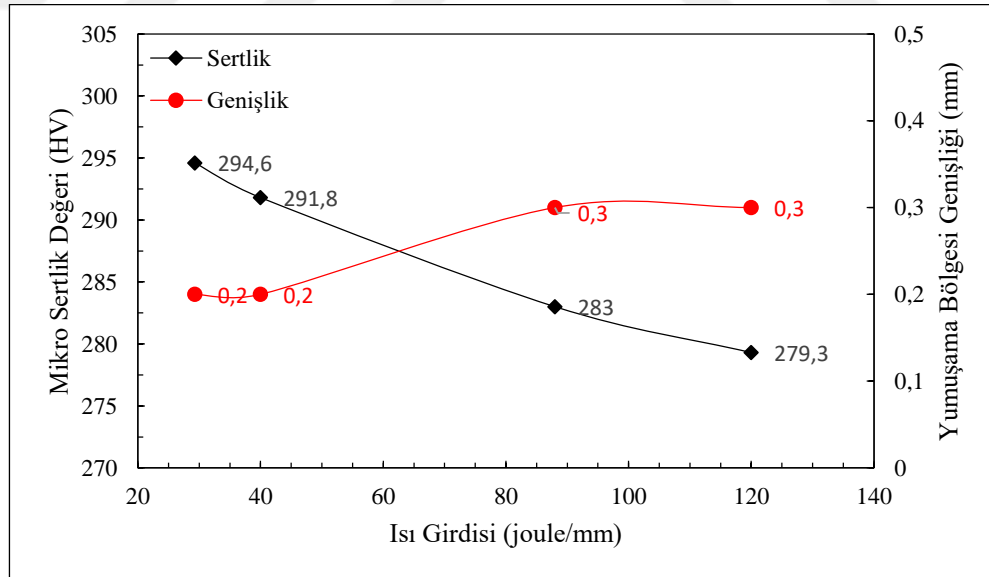
girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numunede (120 joule/mm) 1,2 mm'dir. Isı girdisindeki artışla EB genişliği %50 artmıştır. Isı girdisi ITAB genişliği üzerinde ise daha etkili olmuştur. En düşük ITAB genişliği 3 kodlu numunede 0,8 mm iken en yüksek ITAB genişliği 4 kodlu numunede 2,2 mm'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte ITAB genişliği %175 artmıştır.



**Şekil 4.80.** Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi

Şekil 4.81'de DP1000-DP1000 kombinasyonunda fiber lazer kaynaklı numunelerde farklı ısı girdisiyle ITAB yumuşama bölgelerinde ölçülen en düşük mikro sertlik ve ITAB yumuşama bölgesi genişliği gösterilmektedir. Isı girdisindeki artış ile yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri azalmaktadır (Şekil 4.81). En düşük ITAB yumuşama bölgesi mikro sertlik değeri ısı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numunede (120 joule/mm) 279,3 HV<sub>0,2</sub>'dir. 4 kodlu numunede BM'ye göre (310±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %9,9 düşüktür. Farklı parametrelerle gerçekleştirilen numunelerden ölçülen en düşük ITAB yumuşama bölgesi sertlikleri içerisinde en yüksek ITAB yumuşama bölgesi mikro sertlik değeri ise ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (29,3 joule/mm) 294,6 HV<sub>0,2</sub>'dir. 3 kodlu numunede BM'ye göre (310±5 HV<sub>0,2</sub>) mikro sertlik değeri %4,97 düşüktür. ITAB yumuşama bölgeleri çok dar alanlarda oluşmakla birlikte ısı girdisindeki artışla birlikte genişlikleri de nispeten artmıştır (Şekil

4.81). Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,2 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 4 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,3 mm'dir. Alves ve ark. (2018) 1,8 mm kalınlığında DP1000 saclarda fiber lazer kaynak parametrelerinin mekanik ve mikro yapı özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında İK-ITAB ve AK-ITAB arasındaki yumuşamanın nedeni olarak kalıntı ostenit oluşumunu ve yapıdaki martenzitin temperlenmesini göstermişlerdir. Kalıntı ostenitin boyutsal ve hacimsel oranı EB'den ITAB'a doğru gittikçe artmıştır. EB'de tespit edilen kalıntı ostenit miktarı %0,7 iken AK-ITAB ile İK-ITAB sınırında tespit edilen kalıntı ostenit miktarı %2,9'dur. Yapılan çalışma bu çalışmadaki yumuşama bölgesindeki sertlik düşüşünü de açıklar ve destekler niteliktedir. Ayrıca Huan ve ark. (2019) çalışmalarında fiber lazer kaynağı ile DP780-DP780 ve DP980-DP980 birleştirmeler yapmış olup, DP780-DP780 yumuşama bölgesinde mikro sertlikte BM'ye göre %5,7 ve DP980-DP980'de %9,8 düşüş ölçmüşlerdir. Bu tez kapsamında yapılan sertlik ölçümleri farklı ısı girdisinde kaynak bölgesi mikro sertlik ölçümlerini içermekte olup Huan ve arkadaşlarının çalışmasında ölçülen değerler bu çalışma kapsamında ölçülen sertlik değerleri aralığındadır.



**Şekil 4.81.** Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi



### 4.3.3 Çekme Testleri

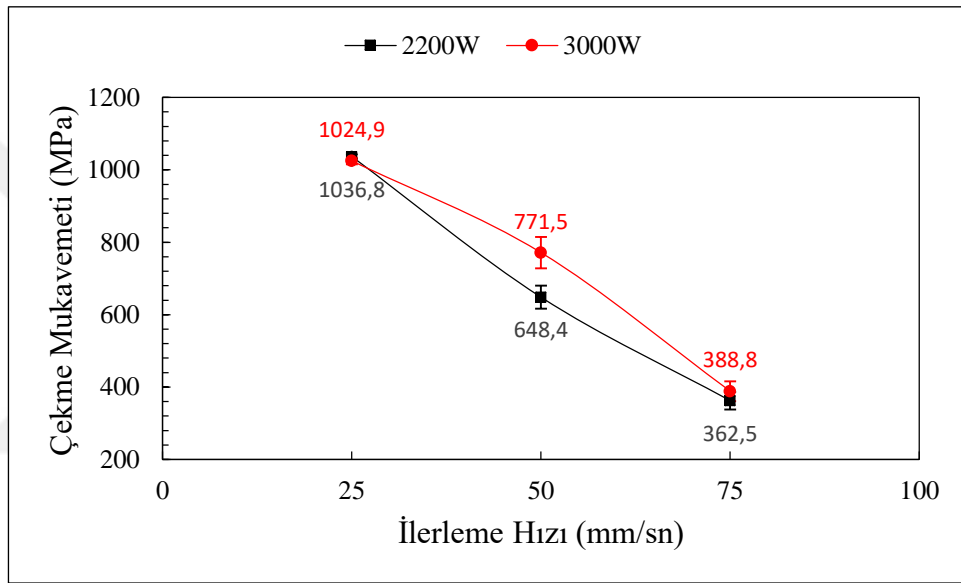
Fiber lazer kaynağı ile birleştirilen DP1000-DP1000 kombinasyonundaki kaynaklı numunelere ait çekme testi sonuçları ve kırılma bölgeleri Çizelge 4.8’de gösterilmiştir. Deneysel iki farklı lazer gücü (2200 W ve 3000 W) ve üç farklı ilerleme hızı (25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn) kullanılarak toplamda altı farklı parametre ile gerçekleştirilmiştir. Kırılma bölgeleri incelendiğinde KM, ITAB ve BM bölgelerinin üçünden de kırılmalar görülmüştür. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu (2200 W, 25 mm/sn) ve 4 kodlu (3000 W, 25 mm/sn) numunelerde yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Farklı parametrelerle üretilen DP1000-DP1000 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları

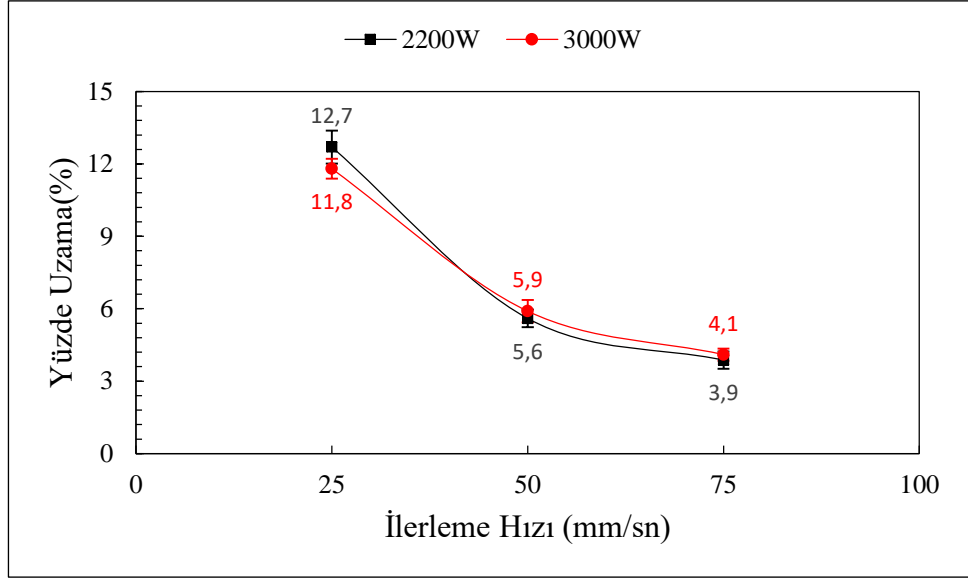
Numune Kodu	Isı Girdisi (Joule/mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Yüzde Uzama (%)	Standart Sapma	Kırılma Bölgesi
1	88	1036,8	6,1	12,7	0,68	BM
2	44	648,4	32,1	5,6	0,36	KM
3	29,3	362,5	24,6	3,9	0,36	KM
4	120	1024,9	9,2	11,8	0,41	BM
5	60	771,5	43,5	5,9	0,46	ITAB
6	40	388,8	27,4	4,1	0,25	KM

2200 W ve 3000 W güç değeri için ilerleme hızının 25 mm/sn’den 75 mm/sn’ye 25 mm/sn adımlarla arttırılması sonucu oluşan çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimi grafikleri sırasıyla Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’te gösterilmiştir. Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’te gösterildiği gibi 2200 W ve 3000 W güç değerleri için ilerleme hızındaki artış ile birlikte çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri azalmıştır. 2200 W lazer gücünde birleştirilen 1, 2 ve 3 kodlu numunelerde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri 1 kodlu numunede 2200 W güç ve 25 mm/sn ilerleme hızında 1036,8 MPa ve %12,7’dir. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri 3 kodlu numunede 2200 W güç ve 75 mm/sn ilerleme hızında 362,5 MPa ve %3,9’dur. 2200 W lazer gücünden

ilerleme hızının 25 mm/sn'den 75 mm/sn'ye yükseltilmesiyle çekme mukavemeti %65 yüzde uzama %69,3 azalmıştır. 3000 W lazer gücüne sahip 4, 5 ve 6 kodlu numunelerde ilerleme hızları sırasıyla 25 mm/sn, 50 mm/sn ve 75 mm/sn'dir. 3000 W lazer gücünde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama 4 kodlu numunede 25 mm/sn ilerleme hızında 1024,9 MPa ve %11,8'dir. 6 kodlu numunede ise 3000 W lazer gücü için en düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama 75 mm/sn ilerleme hızında 388,8 MPa ve %4,1'dir. 3000 W lazer gücünde ilerleme hızının 25 mm/sn'den 75 mm/sn'ye artırılmasıyla çekme mukavemeti %62 ve yüzde uzama %65,3 azalmıştır.



**Şekil 4.82.** 2200W ve 3000W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi



**Şekil 4.83.** 2200W ve 3000W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi

Kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10). ANOVA sonucuna bakıldığında çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %98,17 ve %99,38 ile en çok etki eden parametre ilerleme hızı olmuştur. Lazer gücünün çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkisi sırasıyla %0,72 ve %0,04 ile çok düşük kalmıştır. Çekme mukavemetinde kalan hata payı %1,11 ve yüzde uzamada %0,58'dir. Lazer güç değişim aralığının dar olmasının ve aynı zamanda parametre sayısının az olmasının da böyle bir sonuca neden olduğu düşünülmekle birlikte bu tez kapsamında seçilen parametreler kısıtında ilerleme hızının DP1000-DP1000 kombinasyonundaki fiber lazer kaynaklı numuneler için çok etkili bir parametre olduğu söylenebilir.

**Çizelge 4.9.** Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

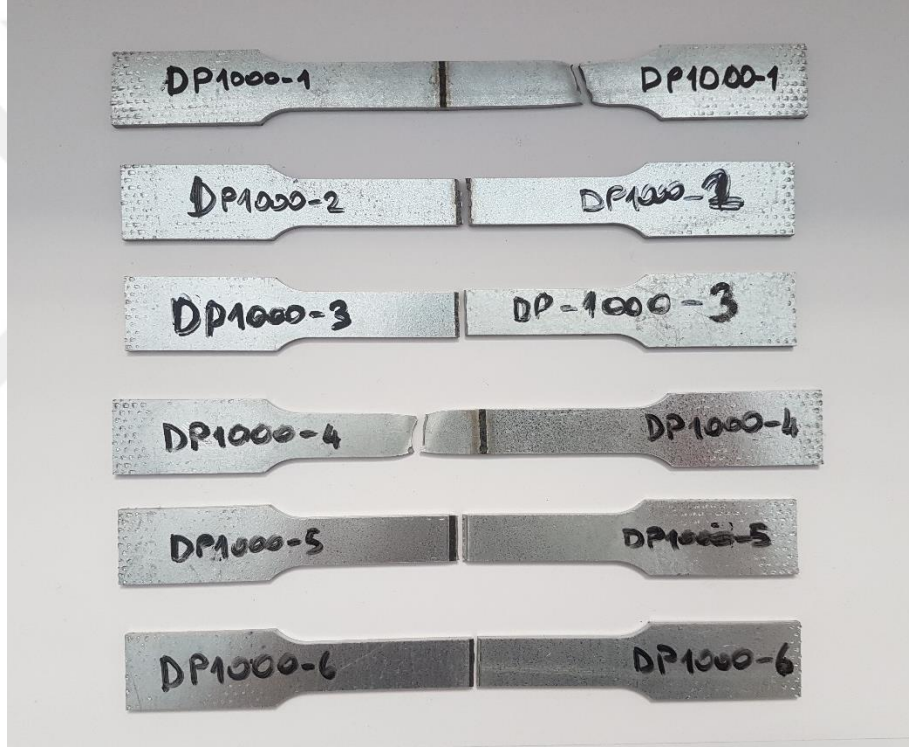
<b>Parametre</b>	<b>DF</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>% Katkı</b>
Lazer Gücü	1	3151	3151	1,30	0,372	0,72
İlerleme Hızı	2	429347	214673	88,66	0,011	98,17
Kalan Hata	2	4842	2421			1,11
Toplam	5					100

**Çizelge 4.10.** Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

<b>Parametre</b>	<b>DF</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>	<b>% Katkı</b>
Lazer Gücü	1	0,0267	0,0267	0,12	0,762	0,04
İlerleme Hızı	2	75,5833	37,7917	170,49	0,006	99,38
Kalan Hata	2	0,4433	0,2217			0,58
Toplam	5					100

#### 4.3.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

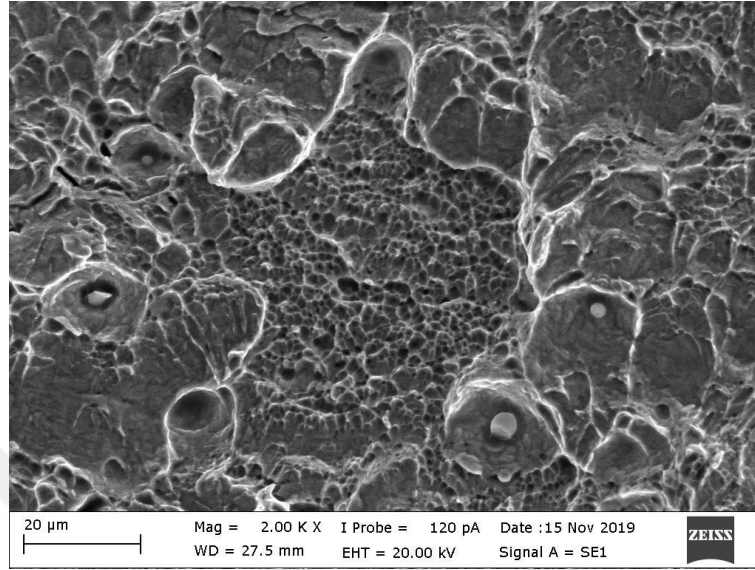
DP1000-DP1000 kombinasyonunda fiber lazer kaynaklı birleştirmelerin çekme deneyi sonrası kırılma fotoğrafları incelendiğinde 1 ve 4 kodlu numunelerin BM'den kırıldığı görülmektedir. 2, 3 ve 6 kodlu numuneler KM'den, 5 kodlu numune ise ITAB'dan kırılmıştır (Şekil 4.84). 1 ve 4 kodlu numunelerin BM'den kırılması DP1000 sacların kaliteli bir şekilde fiber lazer kaynağı ile birleştirildiğini göstermektedir. Özellikle 3 ve 6 kodlu numunelerde yüksek kaynak hızı yeterli kaynak derinliğine ulaşmayı engellemiş ve gevrek kırılmalara neden olmuştur.



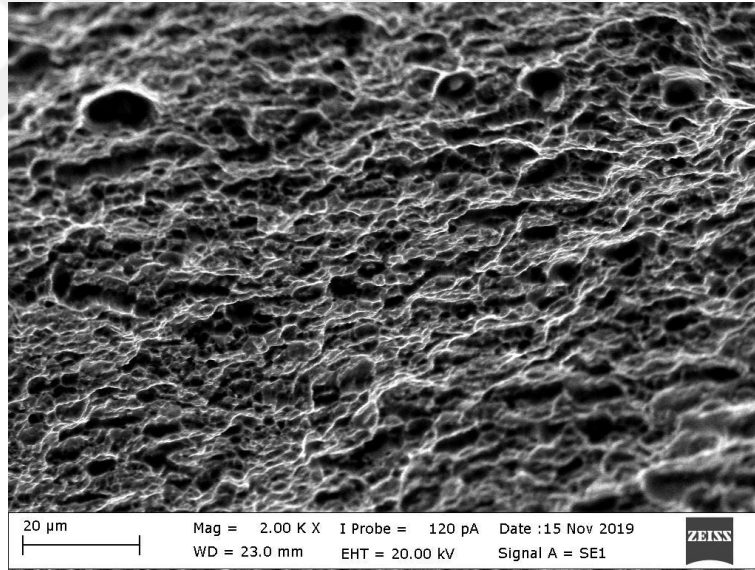
Şekil 4.84. Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler

Şekil 4.85'te DP1000-DP1000 kombinasyonunda farklı parametreler kullanılarak fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (29,3 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu kırılma numunesine (120 joule/mm) ait SEM fotoğrafları gösterilmiştir. 3 kodlu numunede orta kısımda sığ çukurcuklardan oluşan sünek sayılabilecek bir kısım görülse de genel itibariyle plastik şekil değişiminin sınırlı kaldığı gevrek bölgeyi oluşturan düz yüzeyler yoğunluktadır

(Şekil 4.85a). 4 kodlu numune ise çukurcuklu ve yönlenmelerin olduğu sünek kırılma gözlenmiştir (Şekil 4.85b).



a)



b)

**Şekil 4.85.** DP1000-DP1000 fiber lazer ile kaynaklı a) 3 kodlu numune (29,3 joule/mm) ve b) 4 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

#### 4.4 DP1200-DP1200 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler

Bu bölümde DP1200-DP1200 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak (Çizelge 3.6) alın altına birleştirilen numunelerin makro yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir. 1,2 mm kalınlığındaki DP1200 saclar ticari olarak temin edilmiştir.

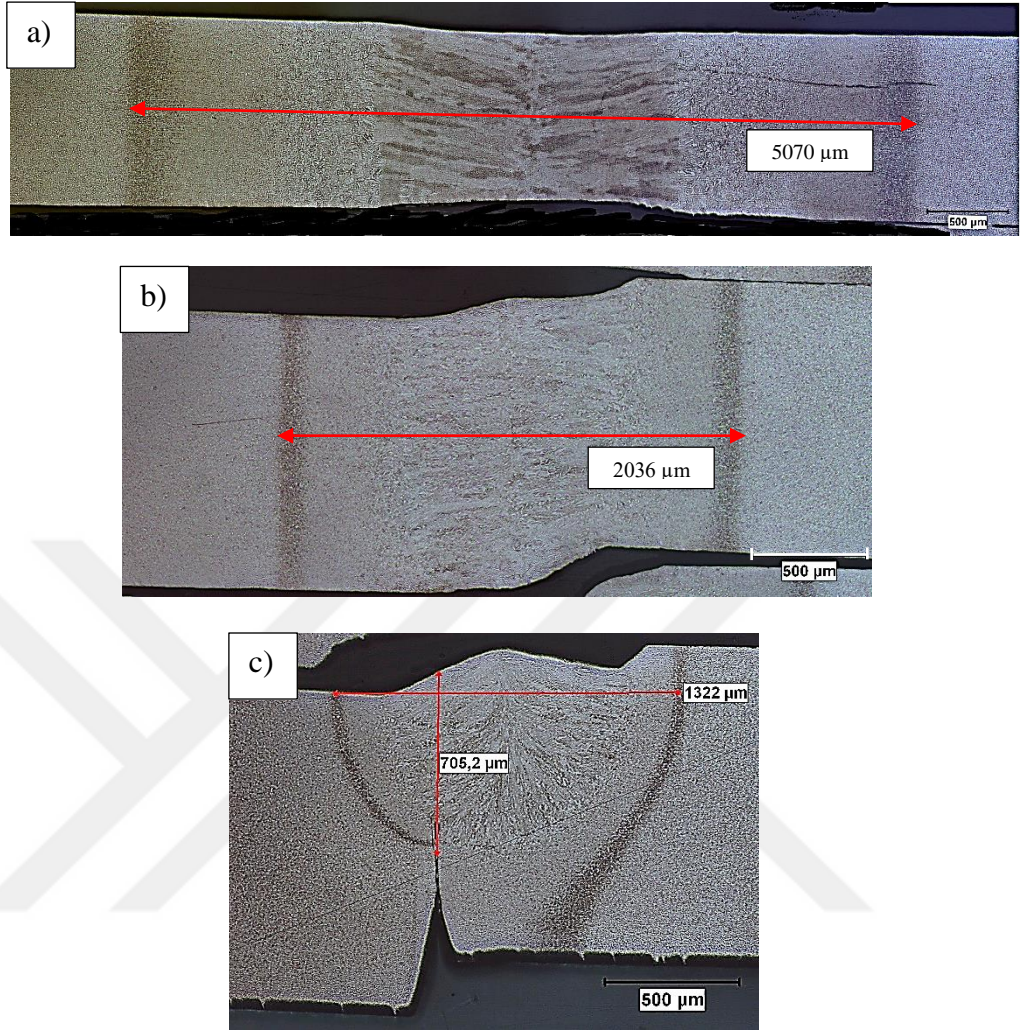
##### 4.4.1 İçyapı İncelemeleri

1,2 mm kalınlığındaki saclar DP1200-DP1200 kombinasyonunda farklı lazer güç ve kaynak ilerleme hızı parametrelerinde alın altına birleştirilmiştir. Kaynak parametrelerinden lazer gücü 2100 W'ta sabitken ilerleme hızı değiştirilmiştir (20 mm/sn, 40 mm/sn, 60 mm/sn, 80 mm/sn ve 100 mm/sn ). İlerleme hızı 60 mm/sn'de sabitken ise lazer gücü (1500 W, 1800 W, 2100 W, 2400 W, 2700 W) değiştirilmiştir. 1, 3, 5, 6 ve 9 kodlu numuneler için kaynak bölgesinin makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları alınmıştır (Şekil 4.86-Şekil 4.94). Makro yapı fotoğraflarında her bir numunenin iki AK-ITAB'ı arasındaki kaynak bölgesi genişliği ölçülmüştür. EB ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. ITAB a, b, c ve d ile gösterilen bölümlere ayrılmış ve bu bölümlerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu farklı bölgelerde a ve b ile gösterilen kısımlar sırası ile KT-ITAB ve İT-ITAB'ı ifade etmektedir. Bu bölgelerde kaynak sırasında ısı girdisi  $A_3$  sıcaklığının üzerine çıkmaktadır.  $A_1$ - $A_3$  sıcaklık aralığındaki İK-ITAB ise c ile ifade edilmiştir. İK-ITAB ile BM arasında AK-ITAB oluşmaktadır. AK-ITAB'da sıcaklık  $A_1$ 'in altında kalmakta ve d ile gösterilmektedir.

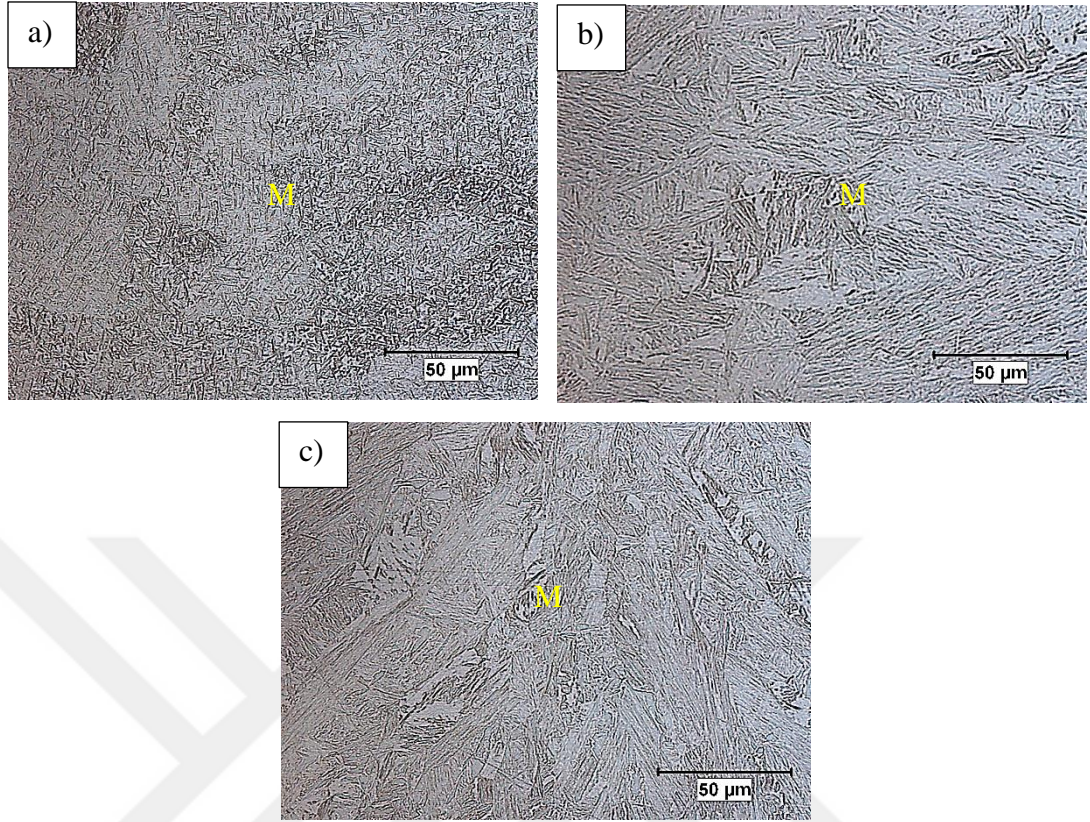
2100 W sabit lazer gücünde ilerleme hızı 20 mm/sn, 60 mm/sn ve 100 mm/sn olan 1 kodlu (105 joule/mm), 3 kodlu (35 joule/mm) ve 5 kodlu (21 joule/mm) numunelere ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve tüm numunelere ait ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.86-Şekil 4.90 arasında gösterilmektedir. 1 kodlu ısı girdisinin en yüksek olduğu numune 5 kodlu numunenin beş katı ısı girdisine sahiptir. Şekil 4.86'da 1, 3 ve 5 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğraflarında iki AK-ITAB arasındaki kaynak genişlik ölçümleri de verilmiştir. 1 kodlu (105 joule/mm) ve 3 kodlu (35 joule/mm) numunelerde kaynak kökü birleşirken ısı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numunede (21 joule/mm) kaynak kökü birleşmemiştir. 5 kodlu numunede düşük ısı girdisi kaynak

kökünü birleştirebilmek için yetersiz kalmıştır. Isı girdisi ile kaynak genişlikleri arasında doğrudan bağlantı olduğu kaynak genişlik ölçümlerinde görülmektedir (Şekil 4.86). Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneden (105 joule/mm) ısı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) doğru azalan ısı girdisiyle birlikte 1, 3 ve 5 kodlu numunelerde kaynak bölgesi genişlikleri (5070  $\mu\text{m}$ , 2036  $\mu\text{m}$  ve 1322  $\mu\text{m}$ ) azalmıştır. Makro yapı fotoğraflarında EB’de tüm numunelerde genel itibariyle martenzitten oluşan içyapılar belirgindir (Şekil 4.86). Özellikle ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede martenzit lamellerinin aşırı ısı girdisinin etkisiyle çok fazla kalınlaştığı makro yapı fotoğrafında görülmektedir (Şekil 4.86a). Isı girdisinin düşmesiyle birlikte martenzit lamelleri incelmıştır. Martenzit lamellerindeki bu incelmenin EB mikro sertlik değerlerini arttırması beklenmektedir.





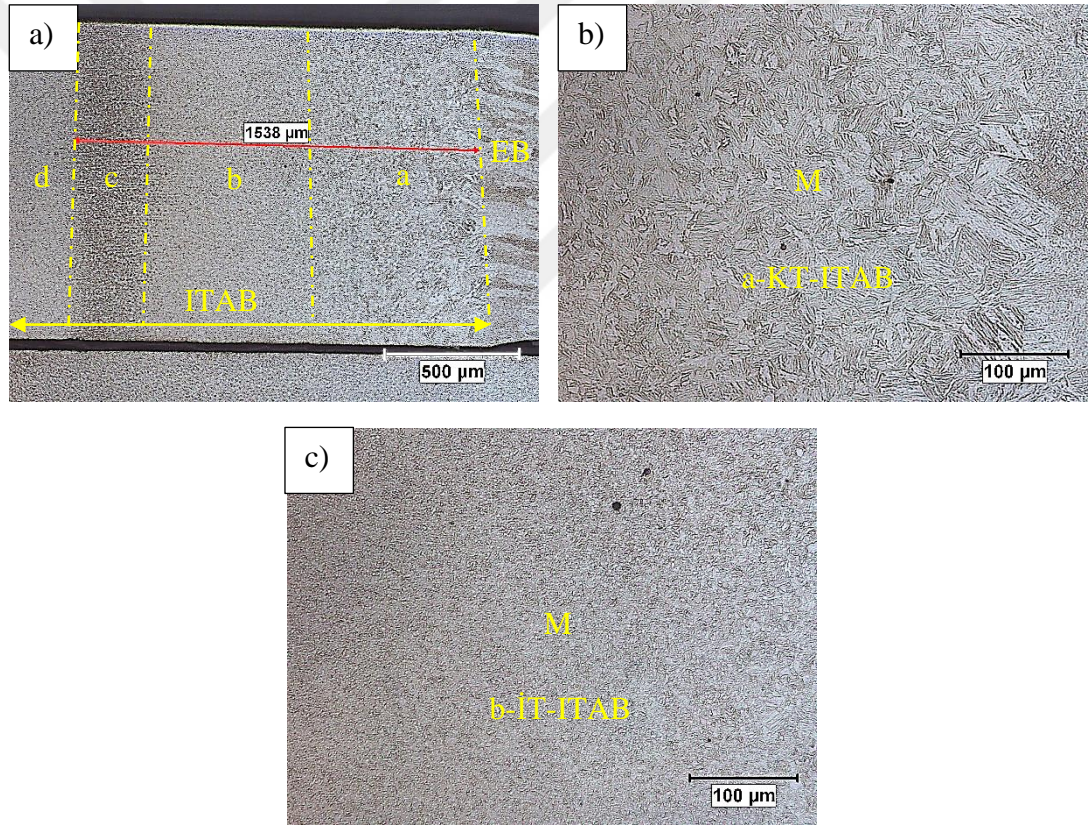
**Şekil 4.86.** a) 1 kodlu numune (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) , b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



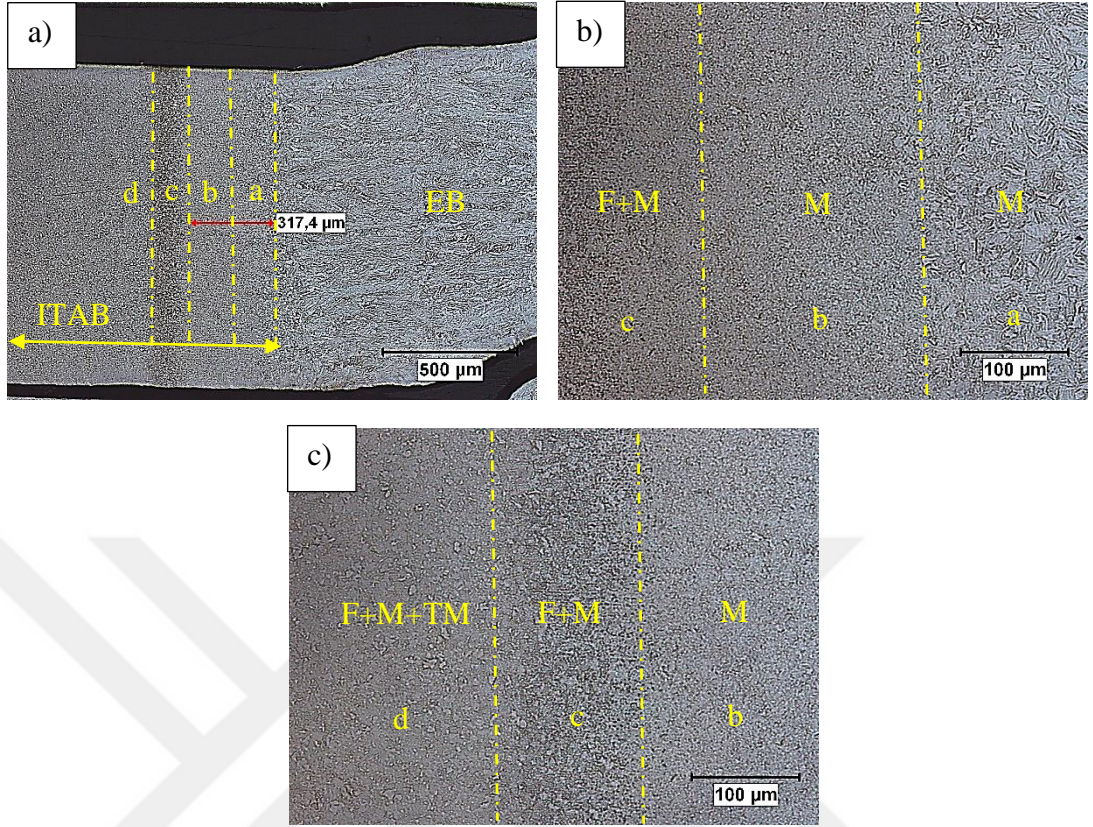
**Şekil 4.87.** a) 1 kodlu numune (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) ait EB mikro yapı görüntüleri

1, 3 ve 5 kodlu numunelere ait ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.88-Şekil 4.90 arasında gösterilmiştir. EB sınırından AK-ITAB sınırına kadar genişlik ölçümleri yapılarak ısı girdisinin KT-ITAB, İT-ITAB ve İK-ITAB'ları kapsayan bölgenin genişliğine olan etkisi de belirlenmiştir. Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneden (120 joule/mm) ısı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) doğru KT-ITAB, İT-ITAB ve İK-ITAB'ı kapsayan bölgenin genişliği 1, 3 ve 5 kodlu numunelerde sırasıyla 1538 µm, 317,4 µm ve 136,8 µm olarak ölçülmüştür. Isı girdisindeki düşüş ile bu bölgenin genişliğindeki düşüş oldukça dikkat çekicidir. Özellikle ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (120 joule/mm) 1538 µm'lik genişlik 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın fiber alın kaynağı için oldukça yüksek bir değerdir. Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numunede (21 joule/mm) ölçülen 136,8 µm'de diğer numunelere göre çok düşük kalmıştır. KT-ITAB'ı ifade eden a bölgesi (A<sub>3</sub>

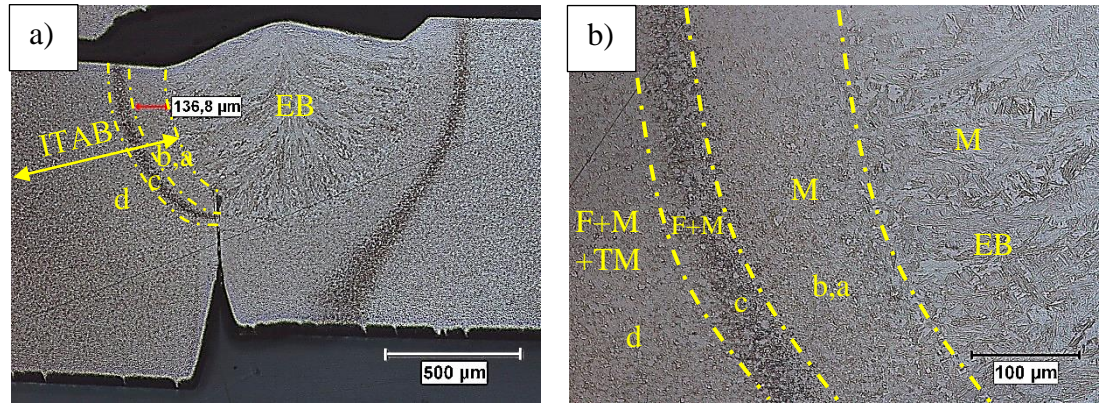
sıcaklığının üzerinde) genel itibarıyla martenzit iç yapısına sahiptir. 1 kodlu numunede ısı girdisinin de yüksek olmasıyla KT-ITAB'da diğer numunelere göre tane irileşmesi daha fazladır. A<sub>3</sub> sıcaklığının yine üzerinde olan fakat KM'ye uzaklığı sebebiyle a bölgesine göre daha düşük sıcaklığa daha az süre maruz kalan b bölgesinde ince taneli martenzitik iç yapılar söz konusudur. A<sub>1</sub>-A<sub>3</sub> sıcaklıklarının arasında kalan c bölgesi DP 1200'ün BM sinde yüksek oranda martenzit bulunmasından dolayı makro yapı fotoğraflarında net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu bölgelerde martenzit+ferriten oluşan bir iç yapı vardır. AK-ITAB ise A<sub>1</sub> sıcaklığının altında kalmakta ve bu yüzden BM iç yapısında bulunan martenzitler temperlenmektedir.



**Şekil 4.88.** 1 kodlu numuneye (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı, b) KT-ITAB mikro yapı ve c) İT-ITAB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)

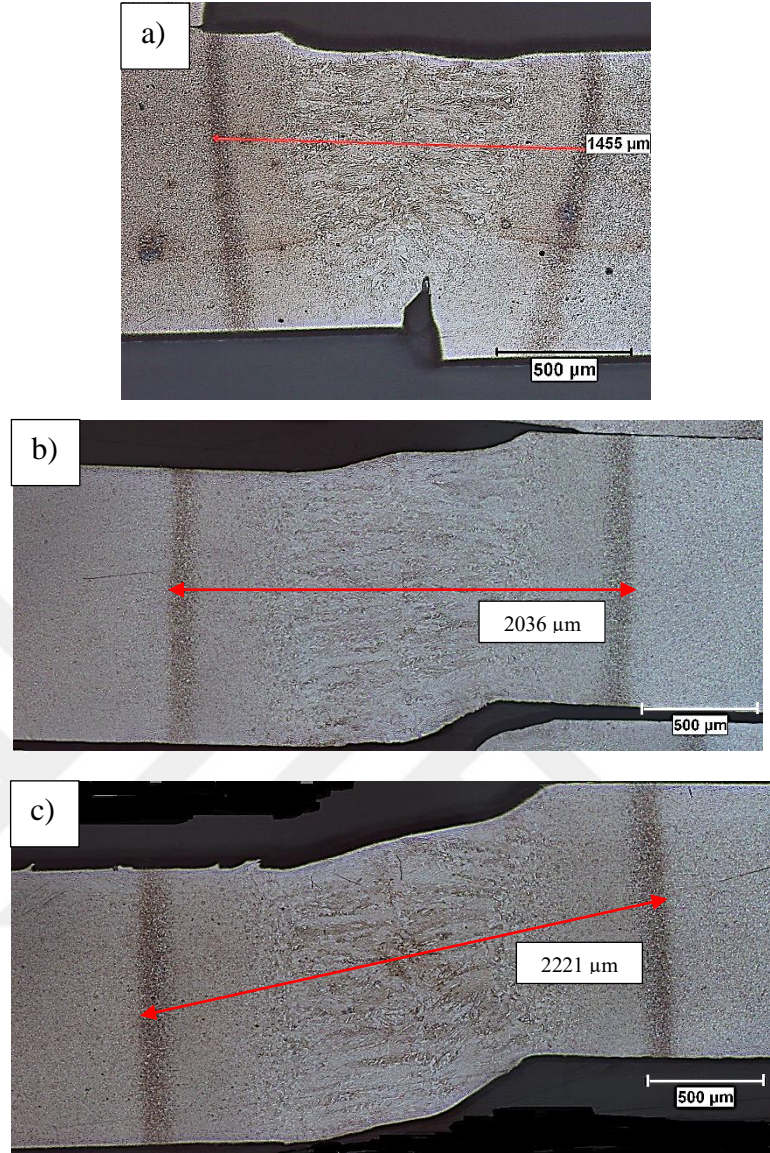


**Şekil 4.89.** 3 kodlu numuneye (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı, b) KT-ITAB, İT-ITAB ve İK-ITAB mikro yapı, c) İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB mikro yapı görüntüleri (F: Ferrit, M: Martenzit ve TM: Temperlenmiş Martenzit)

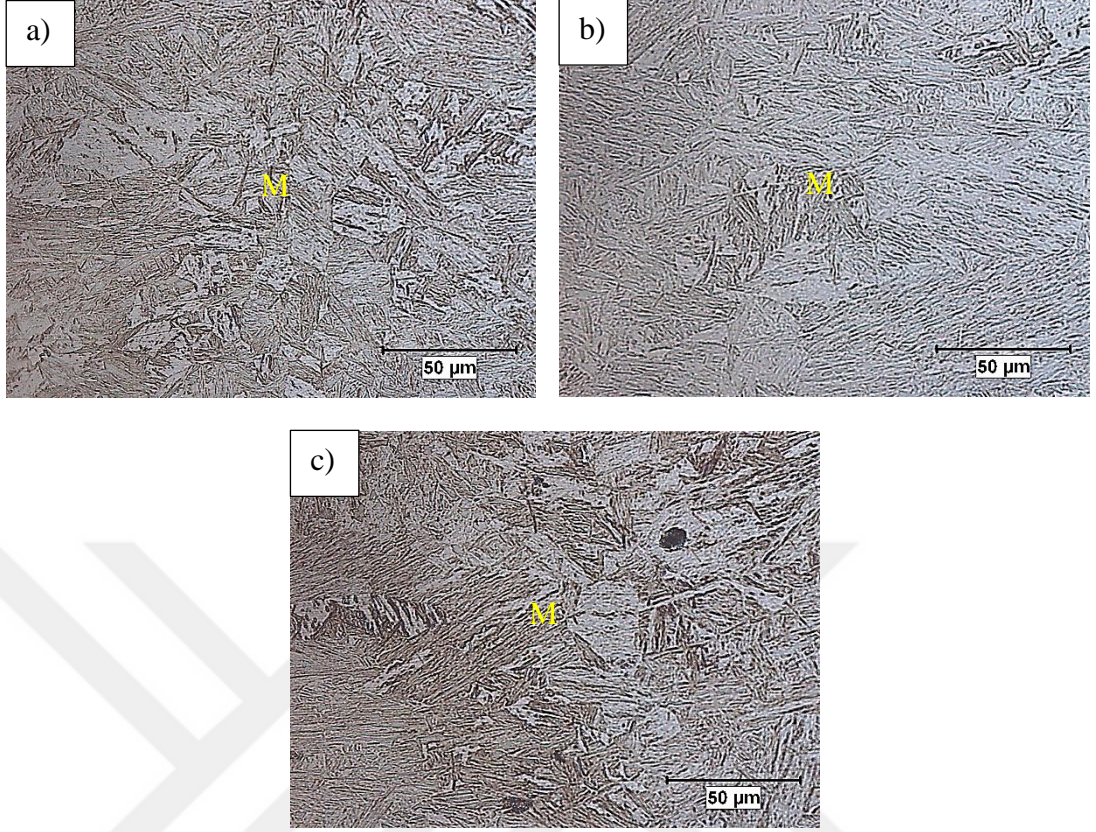


**Şekil 4.90.** 5 kodlu numuneye (2100 W, 100 mm/sn-21joule/mm) ait a) ITAB makro yapı ve b) ITAB mikro yapı görüntüleri (F: Ferrit, M: Martenzit ve TM: Temperlenmiş Martenzit)

Şekil 4.91-Şekil 4.94 arasında 60 mm/sn sabit ilerleme hızında lazer güçleri 1500 W, 2100 W ve 2700 W olan 6 kodlu (25 joule/mm), 3 kodlu (35 joule/mm) ve 9 kodlu (45 joule/mm) numunelere ait makro yapı, EB mikro yapı ve tüm numunelere ait ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmektedir. Sabit ilerleme hızında ısı girdisinin en yüksek olduğu 9 kodlu numune ısı girdisinin en düşük olduğu 6 kodlu numunenin 1,8 katı ısı girdisine sahiptir. 3 ve 9 kodlu numunelerde kaynak kökünde birleşme sağlanırken 6 kodlu ısı girdisinin en düşük olduğu numunede kaynak kökünde birleşme sağlanamamıştır. Şekil 4.91’de 6, 3 ve 9 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğrafları gösterilmiş ve iki AK-ITAB sınırı arasında kaynak genişlik ölçümleri yapılmıştır. Isı girdisi ile kaynak genişlikleri arasında doğrudan bağlantı olduğu kaynak genişlik ölçümlerinde görülmektedir. Isı girdisinin en düşük olduğu 6 kodlu numuneden (25 joule/mm) en yüksek olduğu 9 kodlu numuneye (45 joule/mm) doğru 6, 3 ve 9 kodlu numunelerde kaynak genişlikleri (1455 µm, 2036 µm, ve 2221 µm) artmıştır. 6, 3 ve 9 numunelere ait EB’ler ise Şekil 4.92’de görülmektedir. Tüm numunelere ait EB’lerin içyapısı genel itibariyle martenzit fazından oluşmaktadır. Isı girdisindeki artışla birlikte martenzit lamellerinin kalınlığı artmıştır (Şekil 4.92).

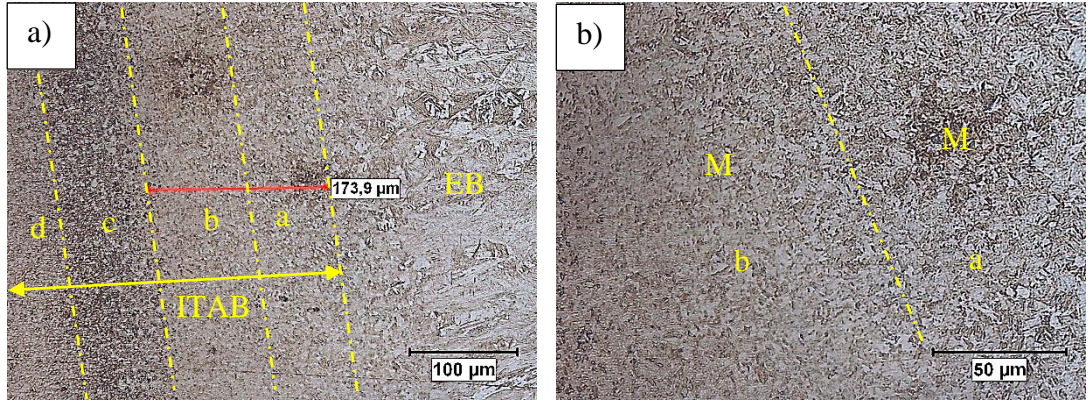


**Şekil 4.91.** a) 6 kodlu numune (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri

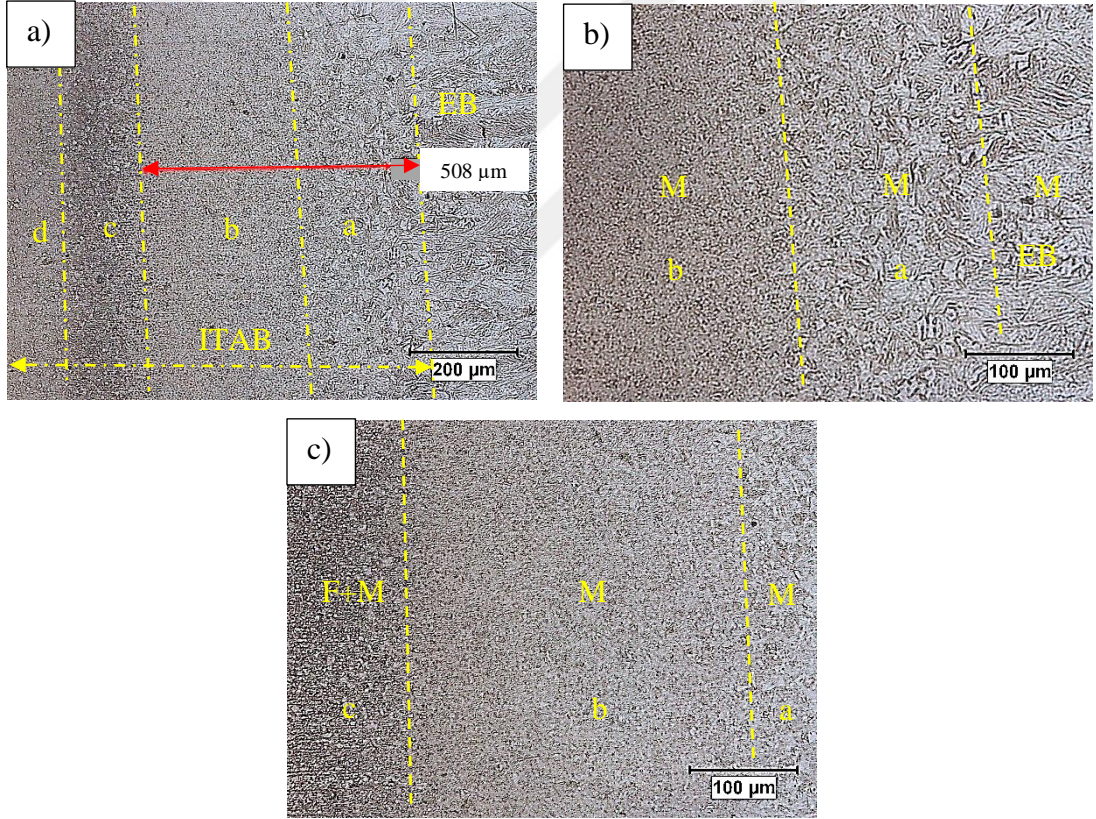


**Şekil 4.92.** a) 6 kodlu numune (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm), b) 3 kodlu numune (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) ve c) 9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait EB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)

6 ve 9 kodlu numunelere ait ITAB makro ve mikro yapı görüntüleri Şekil 4.93-Şekil 4.94 arasında verilmiştir. 3 kodlu numuneye ait ITAB makro yapı ve mikro yapı görüntüsü Şekil 4.89'da gösterilmiştir. 6, 3 ve 9 kodlu numunelerde KT-ITAB ve İT-ITAB'ı kapsayan bölgenin ölçümleri ITAB görüntüleri üzerinden alınmıştır. Bu bölgelerin genişlikleri 6, 3 ve 9 kodlu numunelerde (173,9 µm, 317,4 µm ve 508 µm ) ısı girdisindeki artışla birlikte artmaktadır. Ayrıca ısı girdisindeki artış KT-ITAB'larda tane irileşmesine neden olmuştur (Şekil 4.93-Şekil 4.94).



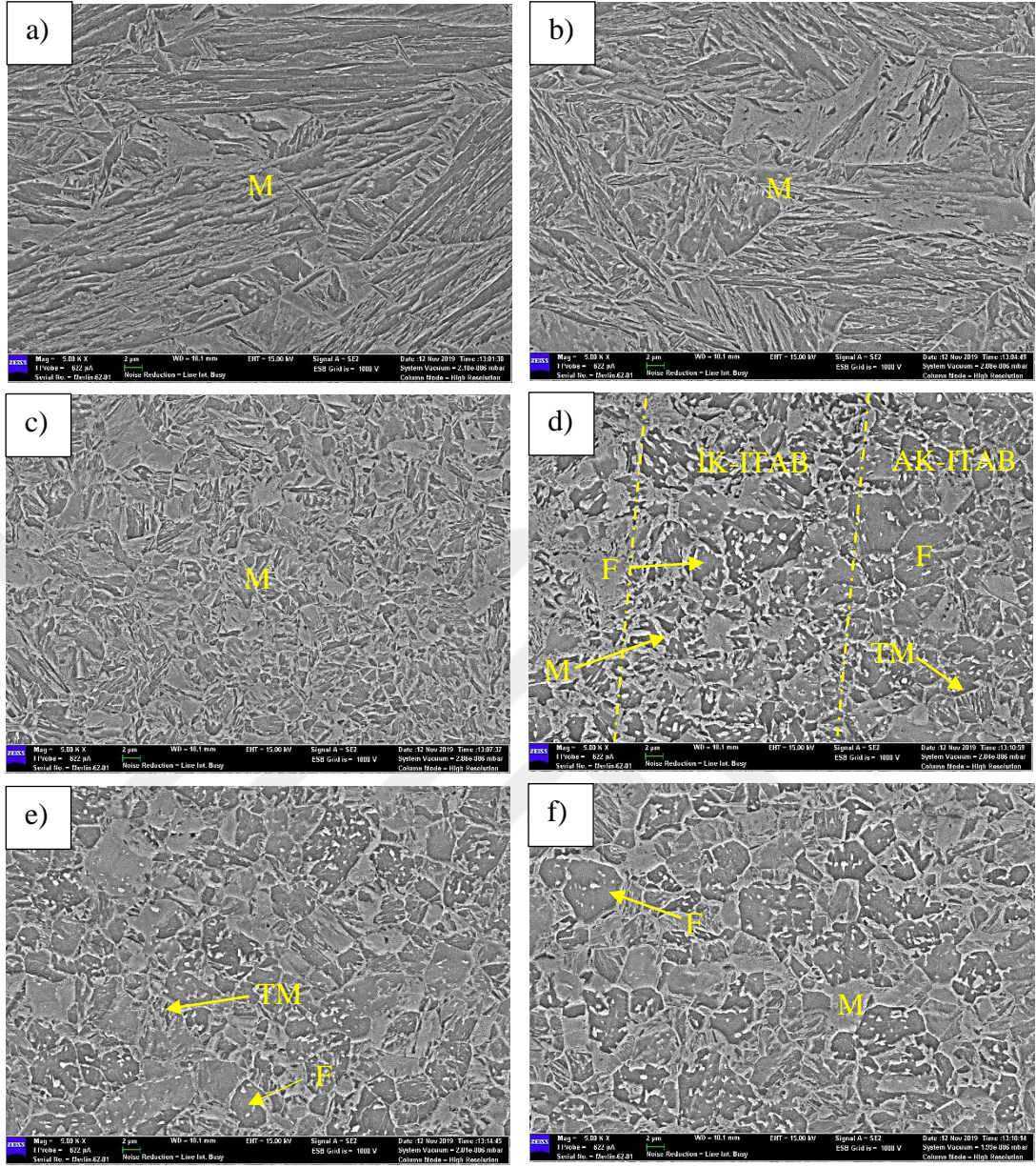
**Şekil 4.93.** 6 kodlu numuneye (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı ve b) ITAB mikro yapı görüntüleri (M: Martenzit)



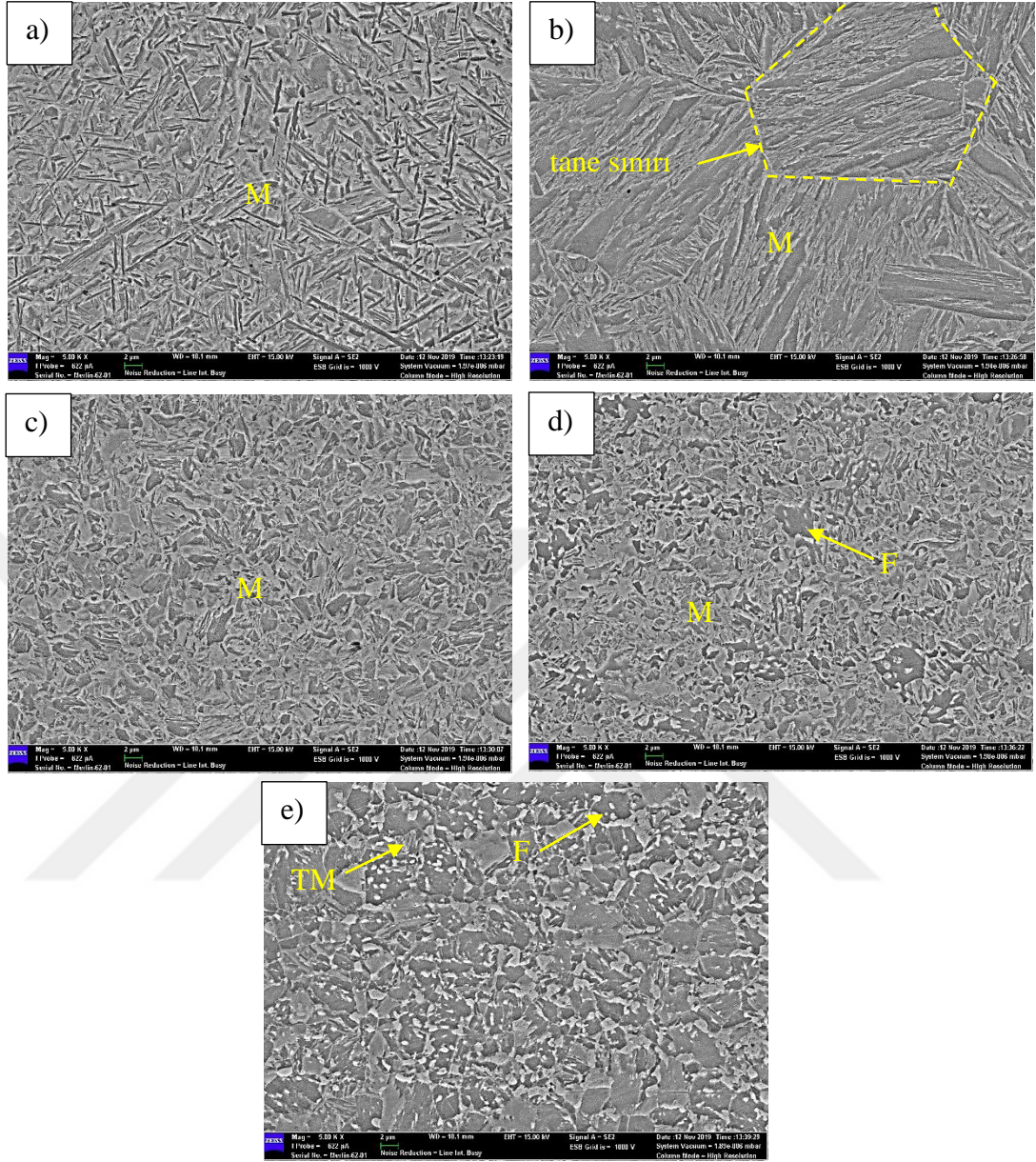
**Şekil 4.94.** 9 kodlu numuneye (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) ait a) ITAB makro yapı b) KT-ITAB ve İT-ITAB mikro yapı c) KT-ITAB, İT-ITAB ve AK-ITAB mikro yapı görüntüleri



DP1200-DP1200 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 5 kodlu numune (21 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait Şekil 4.88 ve Şekil 4.90'da işaretlenen EB, ITAB a, b, c, d bölgeleri ve DP1200 BM'ye ait SEM görüntüleri Şekil 4.95 ve Şekil 4.96'da verilmiştir. 5 ve 1 kodlu numunelerin EB'leri genel itibariyle martenzitten oluşmaktadır (Şekil 4.95a ve Şekil 4.96a). Fakat 1 kodlu numunede (105 joule/mm) ısı girdisinin çok yüksek olmasından dolayı çubuk şeklindeki martenzit yapısı bozulmuştur (Şekil 4.96a). 1 kodlu numunenin EB'sindeki martenzit lamellerinin aşırı derecede kalınlaşması Şekil 4.86 ve Şekil 4.87'deki optik mikroskop görüntülerinde de net bir şekilde görülmüştü. 1 ve 5 kodlu numunelerin KT-ITAB'ları karşılaştırıldığında ise her iki numune de genel itibariyle martenzit içyapısına sahip olmasına rağmen 1 kodlu numune daha yüksek ısıya daha uzun süre maruz kaldığından dolayı tane irileşmesi gerçekleşmiştir (Şekil 4.95b ve Şekil 4.96b). KT-ITAB'da olduğu gibi yine A<sub>3</sub> sıcaklığının üzerine çıkan İT-ITAB'da her iki numunede de genel itibariyle martenzitik içyapı oluşmasına rağmen ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede etkin yeniden kristallenme gerçekleşmiş ve 5 kodlu numuneye göre daha ince taneli bir içyapı oluşmuştur (Şekil 4.95c ve Şekil 4.96c). İK-ITAB 5 kodlu numunede çok dar bir alanda oluşurken, 1 kodlu numunede bu bölgenin genişliği çok daha fazladır (Şekil 4.95d ve Şekil 4.96d). Her iki numunede de İK-ITAB'da genel itibariyle martenzit+ferritten oluşan bir içyapı vardır (Şekil 4.95d ve Şekil 4.96d). 5 ve 1 kodlu numunenin AK-ITAB'ları karşılaştırıldığında ise ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede BM'de martenzitin daha fazla temperlenerek yüksek oranda temperlenmiş martenzite dönüştüğü görülmektedir (Şekil 4.95e ve Şekil 4.96e). Ayrıca DP1200 çeliğinin martenzit ve ferritten oluşan BM içyapısı Şekil 4.95f'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.95.** Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit)

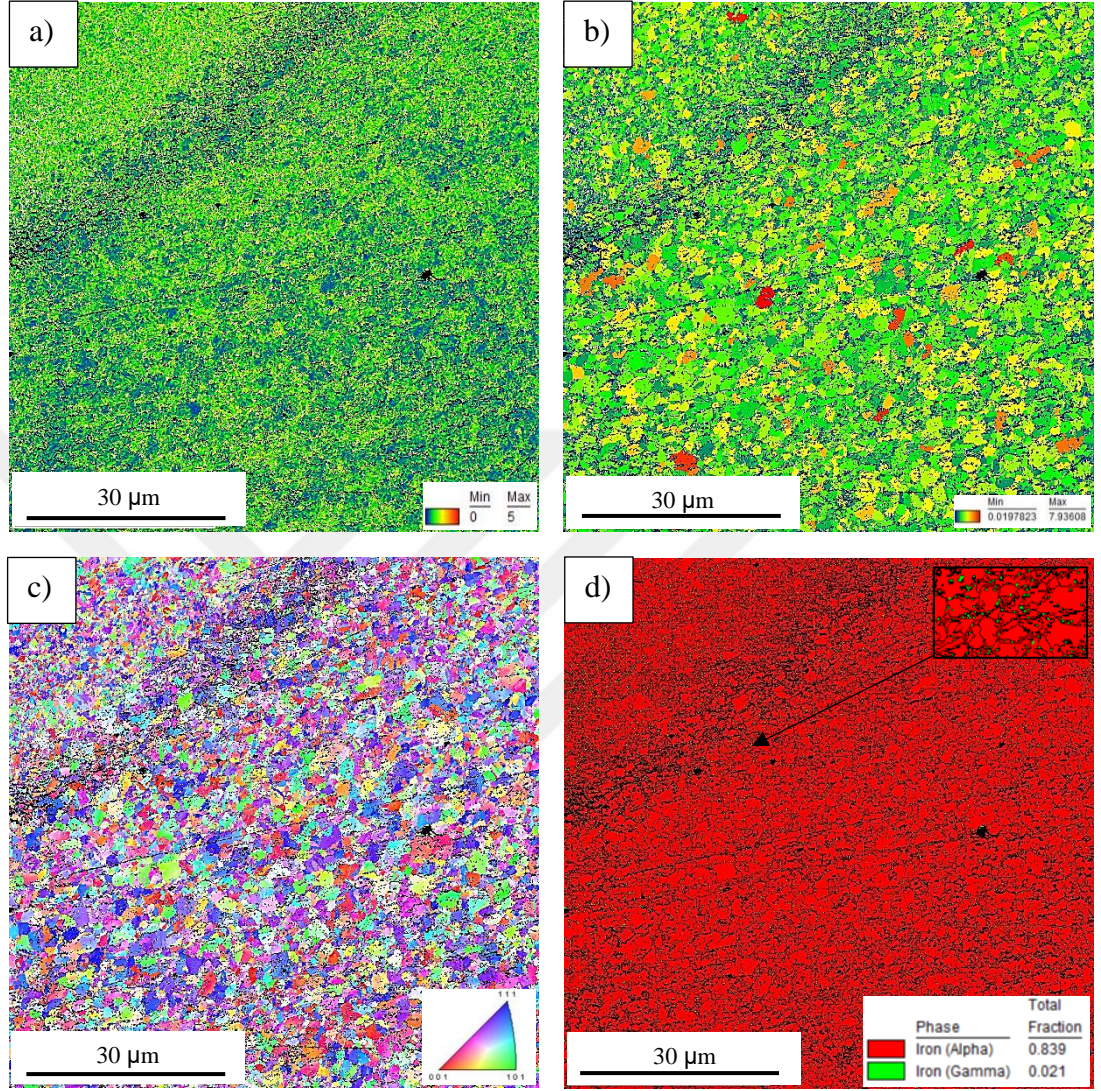


**Şekil 4.96.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB ve e) AK-ITAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit)

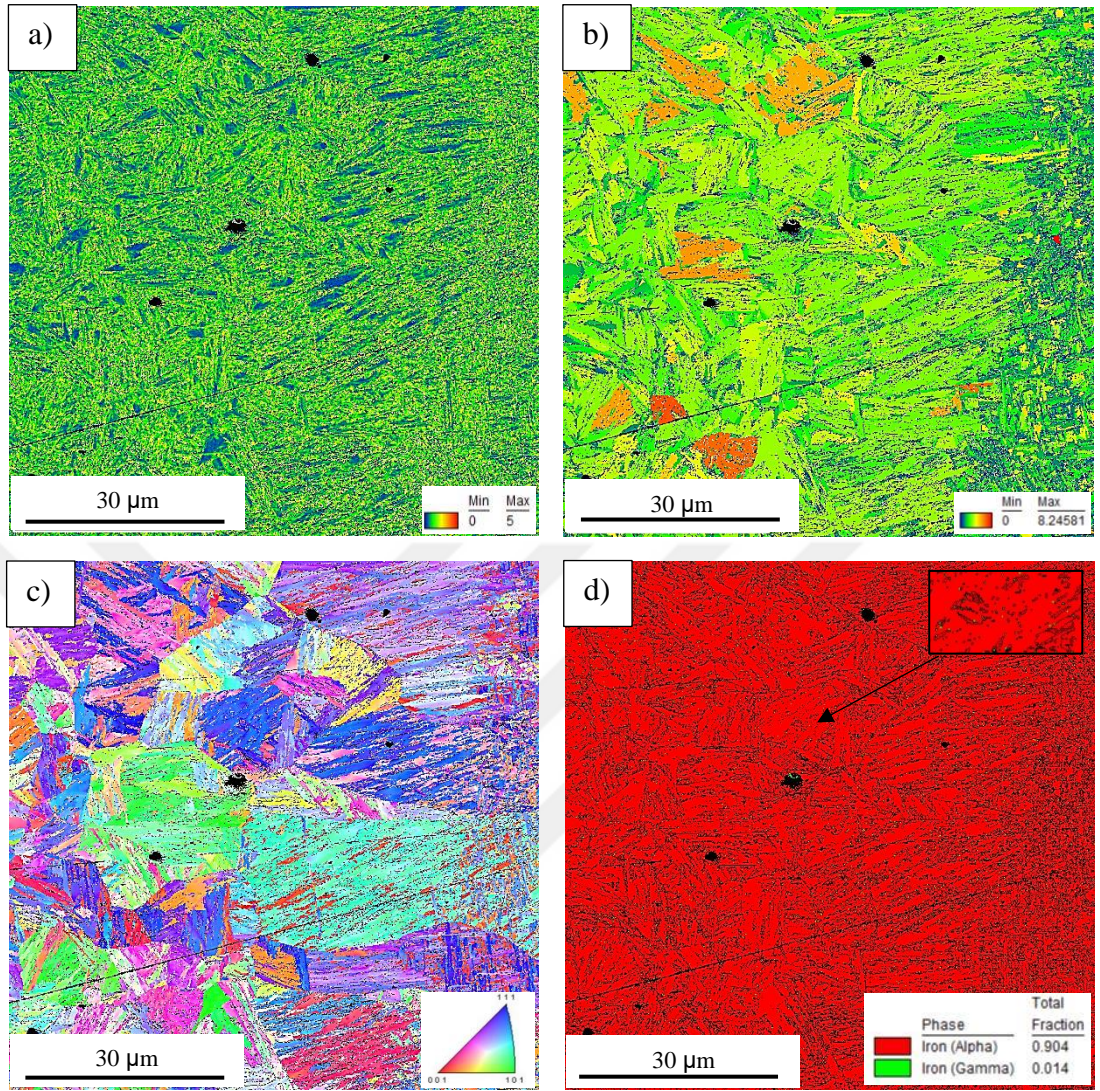
DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı numunelere daha detaylı bir içyapı analizi için EBSD analizleri uygulanmıştır. Karşılaştırma için tüm numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 5 kodlu numune (21 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (120 joule/mm) seçilmiştir. 1 ve 5 kodlu numunelere ait KAM haritası, GOS haritası, IPF haritası ve faz haritaları Şekil 4.97 ve Şekil 4.98’de gösterilmiştir. KAM

analizinde 0°-5° arasındaki değerler ölçülmüştür. Düşük dereceli KAM değerleri düşük deformasyonu ve sert ikincil fazların azlığını göstermekte ve haritalarda mavi renktedir. Şekil 4.97a ve Şekil 4.98a'da KAM haritalarında mavi kısımlar ferrit bölgelerini, yeşil ağırlıklı kısımlar ise martenzit ve beynit bölgelerini göstermektedir. DP1200'de martenzit oranı DP800 ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğundan dolayı DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı 5 kodlu numunenin (21 joule/mm) KAM görüntüsü ile yakın ısı girdisine sahip DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı 9 kodlu numunenin (17,5 joule/mm) KAM görüntüsü karşılaştırıldığında BM'ye doğru mavi kısmın DP1200 kaynağın çok daha az olduğu görülmektedir. 1 ve 5 kodlu numunelerin KAM açısı dağılımları Şekil 4.99'da verilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunede KAM açısı ortalama değeri 1,28 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 5 kodlu numunede KAM açısı değeri 1,26'dır. KAM açısı ortalamaları arasında ve KAM açılarının yüzdesel dağılımları arasında önemli bir fark yoktur. 1 ve 5 kodlu numunelerin GOS haritaları ve GOS açısı dağılımları Şekil 4.97b, Şekil 4.98b ve Şekil 4.99c'de gösterilmektedir. GOS görüntülerinde küçük açılı ve yeniden kristallenmenin etkili olduğu bölgeler mavi renk almaktadır. Düşük ısı girdisine sahip 5 kodlu numunenin GOS değeri 2,8 iken yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numunenin GOS değeri 2,49'dur. 5 kodlu numunede seçili bölgede yeniden kristallenmenin ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numuneye göre daha az etkili olduğu anlaşılmaktadır. 5 ve 1 kodlu numunelerin IPF haritaları Şekil 4.97c ve Şekil 4.98c'de gösterilmiştir. Özellikle ısı girdisinin yüksek olduğu ve genel itibariyle İK-ITAB'ı kapsayan 1 kodlu numunede aşırı büyük tane yapısı dikkat çekmektedir. Şekil 4.99a'da seçili bölgeler için ortalama tane boyutu gösterilmektedir. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede ortalama tane boyutu 2,81 µm iken ısı girdisinin düşük olduğu 5 kodlu numunede ortalama tane boyutu 1,09 µm'dir. 1 kodlu numunede tane boyutu 0,14 µm ile 8,91µm arasında değişirken 5 kodlu numunede tane boyutu 0,14 µm ile 3,54 µm arasında değerler almıştır. 1 kodlu numunede yüksek ısı girdisi ile birlikte aşırı tane irileşmesi dikkat çekicidir. İri taneli yapının yüksek dağılım oranı Şekil 4.99a'da görülebilmektedir. 5 ve 1 kodlu numunelere ait faz haritaları Şekil 4.97d ve Şekil 4.98d'de verilmiştir. Isı girdisinin daha düşük olduğu 5 kodlu numunede seçili bölgenin ostenit oranı %2,1 ve ısı girdisinin daha yüksek olduğu 1 kodlu numunede seçili bölgenin ostenin oranı %1,4'tür. Yüksek ısı girdisi 1 kodlu numunede seçili bölgede ostenit

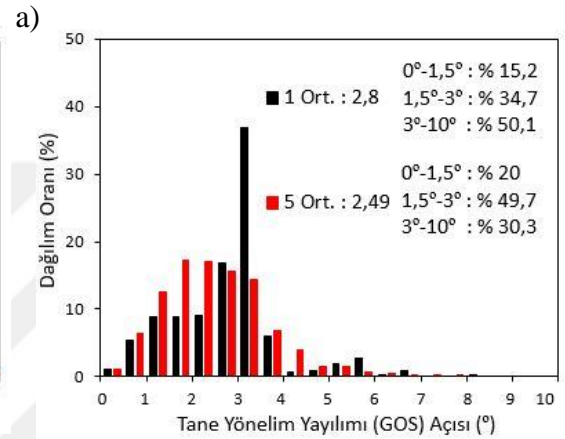
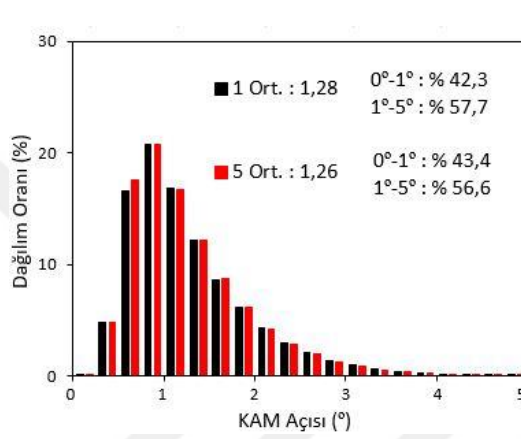
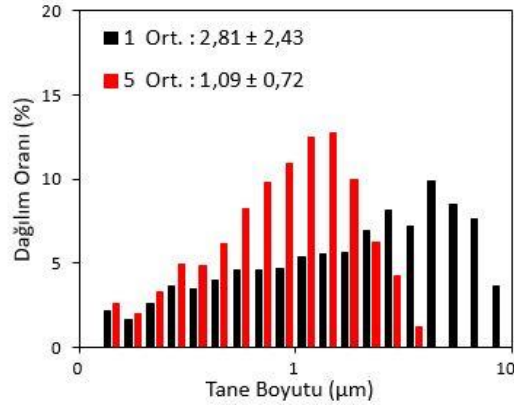
miktarını oldukça azaltmıştır. Ostenit boyutunun da önemli ölçüde küçüldüğü Şekil 4.98d’de görülmektedir.



**Şekil 4.97.** Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



**Şekil 4.98.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numuneye (120 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



b)

c)

**Şekil 4.99.** 1 kodlu (120 joule/mm) ve 5 kodlu (21 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı

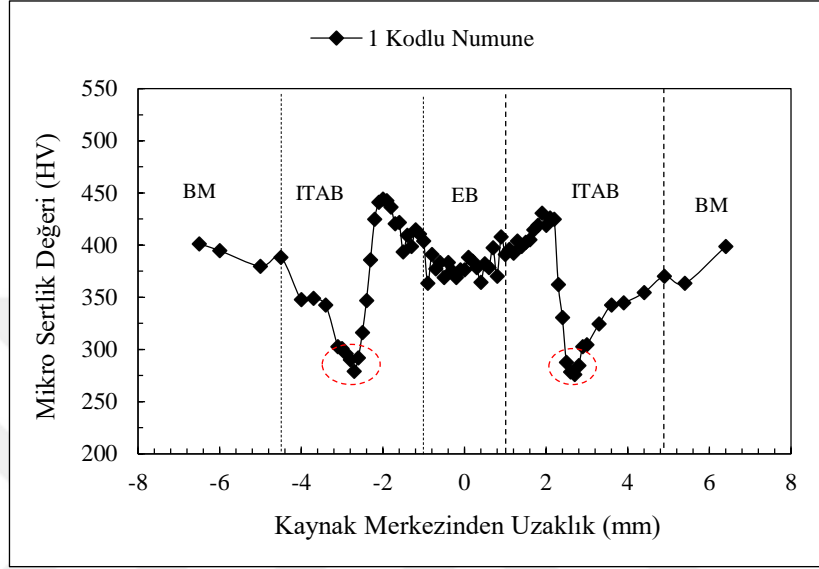
#### 4.4.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

Bu bölümde fiber lazer kaynağı ile DP1200-DP1200 kombinasyonunda birleştirilen numunelerin kaynak penetrasyon derinliğinin ortasında geçen yatay bir hat boyunca 0,1 mm aralıklarla ölçülen mikro sertlik sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır. Mikro sertlik grafiklerinde farklı bölgelere ait sınırlar (EB, ITAB ve BM) belirlenirken sertlik izi bırakıldıktan sonra çekilen makro yapı görüntülerinden de faydalanılmıştır.

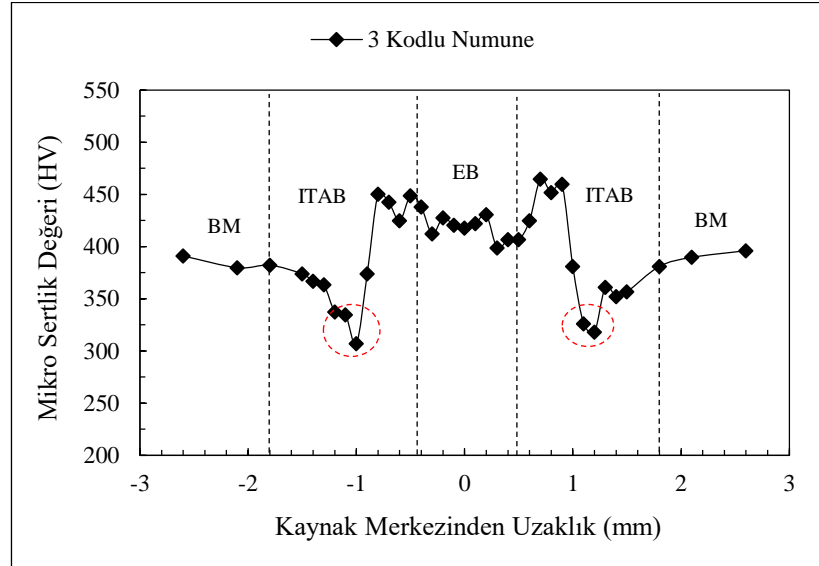
Fiber lazer ile 2100 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (20 mm/sn, 40 mm/sn, 60 mm/sn, 80 mm/sn ve 100 mm/sn) DP1200-DP1200 kombinasyonunda birleştirilen numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (105 joule/mm), 35 joule/mm ısı girdisine sahip 3 kodlu numune ve en düşük ısı girdisine sahip 5 kodlu numuneye (21 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.100-Şekil 4.102'de gösterilmiştir. 1, 3 ve 5 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1,9 mm, 0,9 mm ve 0,8 mm'dir. Isı girdisinin 105 joule/mm'den 35 joule/mm'ye düşmesi sonucu EB genişliğindeki düşüş dikkat çekicidir. 1 kodlu numunede ortalama EB mikro sertlik değerleri 380 HV<sub>0,2</sub>, 3 kodlu numunede ortalama EB mikro sertlik değerleri 417 HV<sub>0,2</sub> ve 5 kodlu numunede ortalama EB mikro sertlik değerleri 432 HV<sub>0,2</sub>'dir. Isı girdisindeki düşüşle birlikte EB mikro sertlik değerleri yükselmiştir. Şekil 4.86 ve Şekil 4.87'deki makro yapı ve EB mikro yapı fotoğraflarında ısı girdisindeki düşüşle beraber martenzit lamellerinde inceleme görülmüştü. Martenzit lamellerinin incelenmesi EB mikro sertlik değerinin yükselmesinin nedenidir. 1 kodlu numune (276,1 HV<sub>0,2</sub>), 3 kodlu numune (307,1 HV<sub>0,2</sub>) ve 5 kodlu numune (329,5 HV<sub>0,2</sub>) ITAB yumuşama bölgelerinde (AK-ITAB içerisinde) BM sertlik değerinden (390±5 HV<sub>0,2</sub>) çok daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Isı girdisindeki artışla beraber sırasıyla 5, 3 ve 1 kodlu numunelerde ITAB yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü sırasıyla %15,51, %21,26 ve %29,21'dir. ITAB genişliği 1 kodlu numunede 3,5 mm, 3 kodlu numunede 1,4 mm ve 5 kodlu numunede 0,6 mm'dir. 1 kodlu numunede ısı girdisinin çok yüksek oluşu (105 joule/mm) 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın lazer kaynağı için olması gerekenden daha büyük EB ve ITAB genişliklerine neden olmuştur. 1 kodlu numunenin KT-ITAB ve İT-ITAB'ında sertlik değerleri EB'nin de üzerinde ve bu yüksek sertliğe sahip bölgenin genişliği 1,2 mm'dir. 3 kodlu numunede de KT-ITAB ve İT-ITAB'da sertlik değerleri EB'den



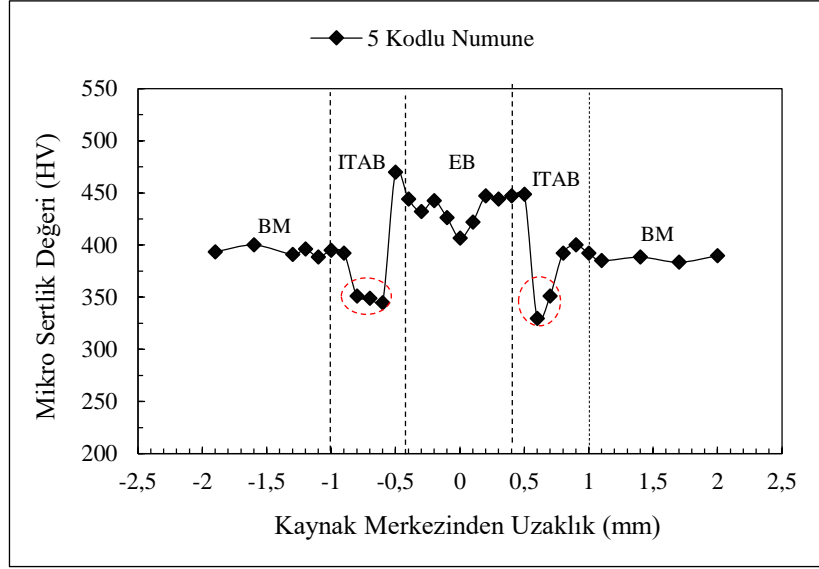
yüksekte ve bu bölgenin genişliği 0,4 mm'dir. Fakat 5 kodlu numunede ısı girdisinin düşük olması (21 joule/mm) nedeniyle EB'den yumuşamanın olduğu ITAB'a geçiş keskin olmuş (sadece 0,1 mm genişliğinde EB'den yüksek sertlikte bir bölge mevcut) ve martenzit oranındaki azalmadan dolayı ani sertlik düşüşü gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.100.** 1 kodlu numunede (2100 W, 20 mm/sn-105 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



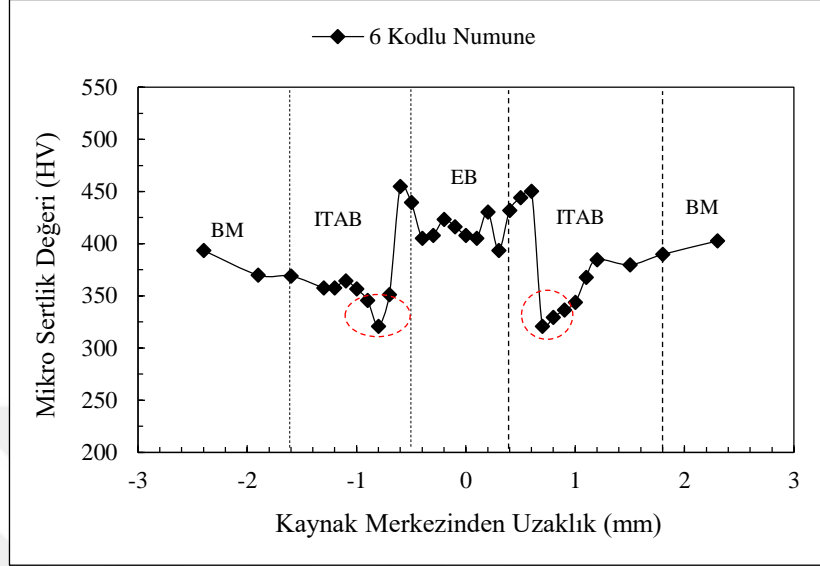
**Şekil 4.101.** 3 kodlu numunede (2100 W, 60 mm/sn-35 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



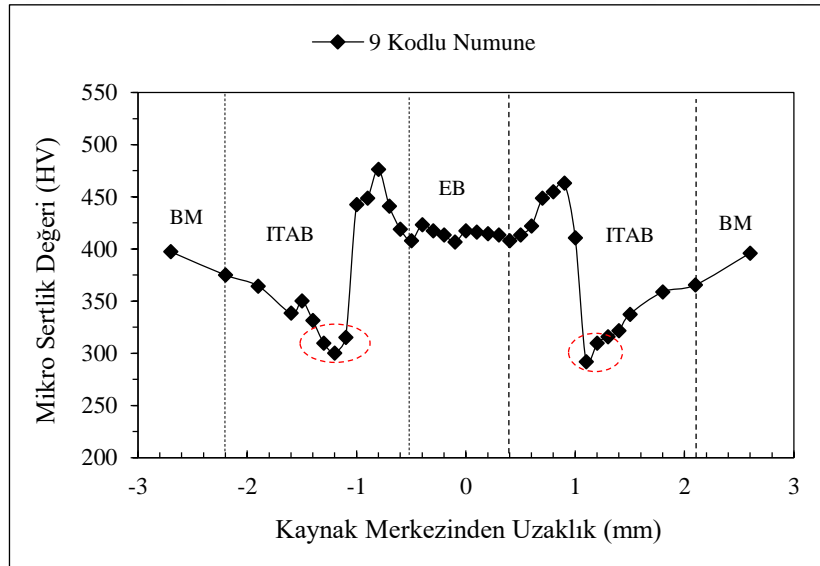
**Şekil 4.102.** 5 kodlu numunede (2100 W, 100 mm/sn-21 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değışimi

Şekil 4.103 ve Şekil 4.104'te fiber lazer kaynağı ile 60 mm/sn ilerleme hızında farklı lazer güçlerinde (1500 W, 1800 W, 2100 W, 2400W ve 2700 W) DP1200-DP1200 kombinasyonunda birleştirilen 6, 7, 3, 8 ve 9 kodlu numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numune (25 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 9 kodlu numuneye (45 joule/mm) ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. 35 joule/mm ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye ait sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.101'de gösterilmiştir. 6, 3 ve 9 kodlu numunelerin EB genişlikleri 0,9 mm'dir. Isı girdisindeki artışla beraber EB'nin artmadığı fakat ITAB genişliğinin arttığı Şekil 4.91'de görülmektedir. 6, 3 ve 9 kodlu numunelerde ortalama EB mikro sertlik değerleri sırasıyla 411 HV<sub>0,2</sub>, 417 HV<sub>0,2</sub> ve 415 HV<sub>0,2</sub>'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte EB mikro sertlik değeri ise az da olsa artış göstermiştir. Isı girdisindeki artışla birlikte daha etkin martenzit oluşumunun gerçekleştiği söylenebilir. 6 kodlu numunene (320,8 HV<sub>0,2</sub>) ve 9 kodlu numunenin (291,8 HV<sub>0,2</sub>) ITAB yumuşama bölgesinde BM sertlik değerinden (390±5 HV<sub>0,2</sub>) sırasıyla %17,74 ve %25,18 daha düşük sertlik değerleri düşmüştür. ITAB genişliği 6 kodlu numunede 1,1 mm, 3 kodlu numunede 1,4 mm ve 9 kodlu numunede 1,7 mm'dir. Isı girdisindeki artış ITAB genişliğinin artmasında etkili olmuştur. 9 kodlu numunede ısı girdisinin 6 kodlu numuneden fazla olmasından dolayı daha geniş KT-ITAB ve İT-ITAB

oluşmuştur. 6, 3 ve 9 kodlu numunelerde sertliğin yüksek olduğu bu bölgelerin genişlikleri sırasıyla 0,2 mm, 0,4 mm ve 0,5 mm'dir.

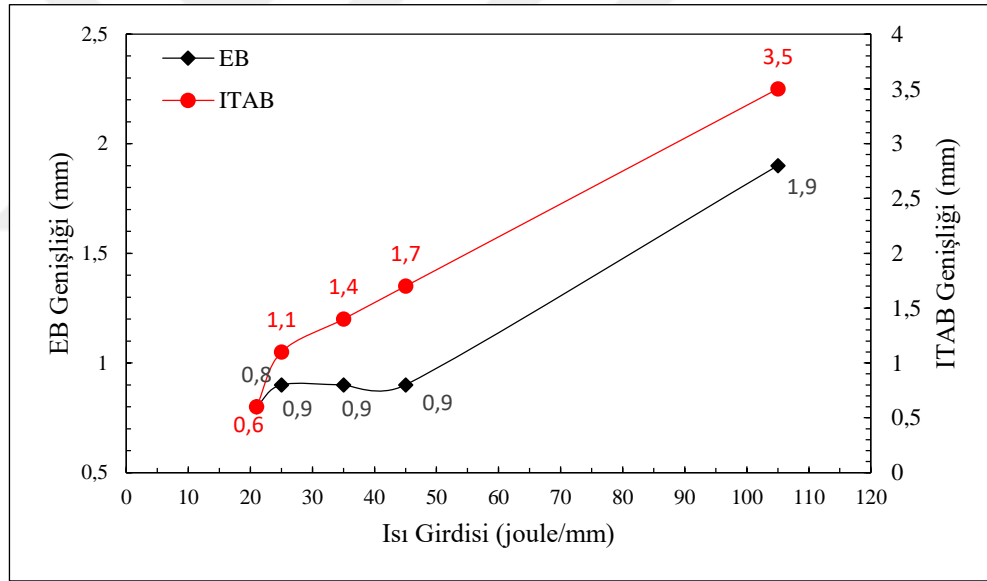


Şekil 4.103. 6 kodlu numunede (1500 W, 60 mm/sn-25 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



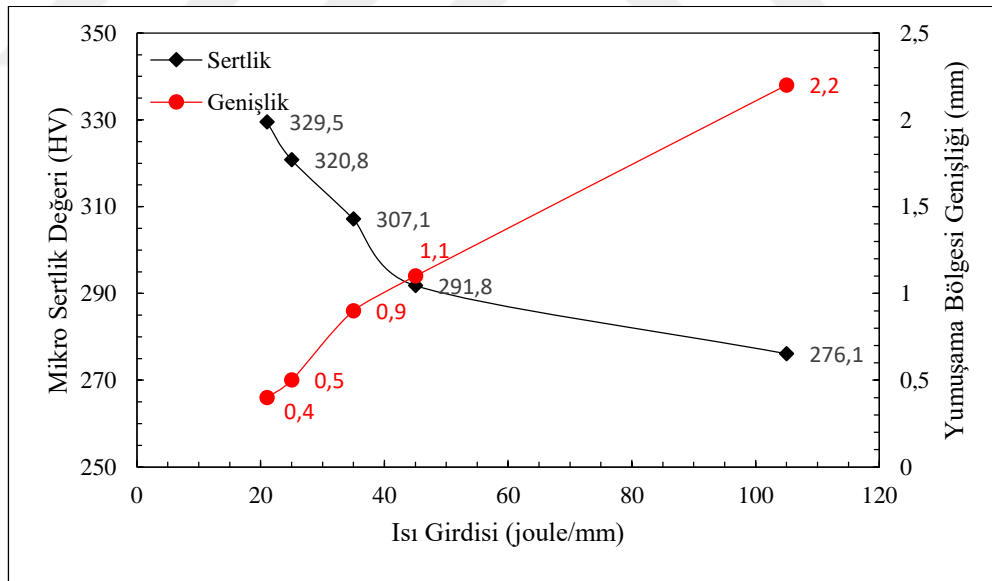
Şekil 4.104. 9 kodlu numunede (2700 W, 60 mm/sn-45 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Mikro sertlik ölçümü sonucu EB ve ITAB genişliklerinin ısı girdisi ile değişimi Şekil 4.105'te gösterilmiştir. Isı girdisindeki artışla birlikte EB genişliği ve ITAB genişliği artmıştır. Tüm numuneler içerisinde ısı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numunede (21 joule/mm) EB genişliği 0,8 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (105 joule/mm) EB genişliği 1,9 mm'dir. Ayrıca 5 kodlu numunede ITAB genişliği 0,6 mm iken 1 kodlu numunede ITAB genişliği 3,5 mm'dir. Isı girdisindeki artış EB genişliğinde ve ITAB yumuşama bölgesi genişliğinde etkili olmuştur. 1 kodlu numunede ölçülen 1,9 mm EB genişliği ve 3,5 mm ITAB genişliği 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın fiber alın kaynağı için çok yüksek değerlerdir. 1 kodlu numunede aşırı ısı girdisi söz konusudur.



Şekil 4.105. Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi

DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı numunelerde farklı ısı girdisiyle ITAB yumuşama bölgelerinde ölçülen en düşük mikro sertlik değerleri ve ITAB yumuşama bölgesi genişliği değişimleri Şekil 4.106'da gösterilmektedir. Isı girdisindeki artış ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri azalmakta ve ITAB yumuşama bölgesinin genişliği artmaktadır. En düşük ITAB mikro sertlik değeri ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (105 joule/mm) 276,1 HV<sub>0,2</sub>'dir. 1 kodlu numunede BM'ye göre mikro sertlik değeri %29,21 daha azdır. Farklı parametrelerle birleştirilen numunelerden ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük sertlik değerleri içerisinde en yüksek ITAB mikro sertlik değeri ise ısı girdisinin en düşük olduğu (21 joule/mm) 5 kodlu numunede 329,5 HV<sub>0,2</sub>'dir. 5 kodlu numunede BM'ye göre mikro sertlik değeri %15,51 daha azdır. Isı girdisindeki artışla beraber yumuşama bölgesi genişlikleri de artmıştır. Isı girdisinin en düşük olduğu 5 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,4 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 2,2 mm'dir. 1 kodlu numunede çok geniş bir ITAB yumuşama bölgesi oluşmuştur.



**Şekil 4.106.** Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değişimi

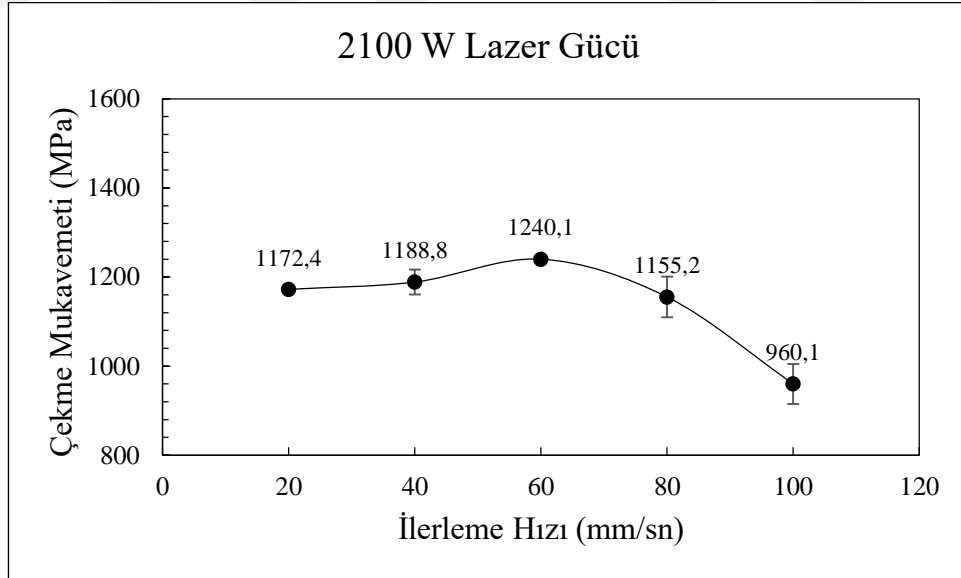
#### 4.4.3 Çekme Testleri

DP1200-DP1200 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilen numunelere ait çekme testi sonuçları ve kırılan numunelerin kırılma bölgeleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Deneylerde lazer gücü 2100 W sabit tutulup ilerleme hızı 20 mm/sn’den 100 mm/sn’ye 20 mm/sn aralıklarla arttırılmış ve ilerleme hızı 60 mm/sn’de sabit tutulup lazer gücü 1500 W’tan 2700 W’a 300 W aralıklarla arttırılmıştır. Böylece dokuz farklı lazer parametresi kullanılarak sabit lazer gücünde ilerleme hızının ve sabit ilerleme hızında lazer gücünün etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerde genel itibariyle yüksek çekme mukavemeti ve nispeten yüksek sayılabilecek yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti 8 kodlu numunede 1266 MPa ve en yüksek yüzde uzama değeri 9 kodlu numunede %6,06’dır. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri ise 6 kodlu numunede 1500 W lazer gücü ve 60 mm/sn ilerleme hızında 818,1 MPa ve %3,41’dir.

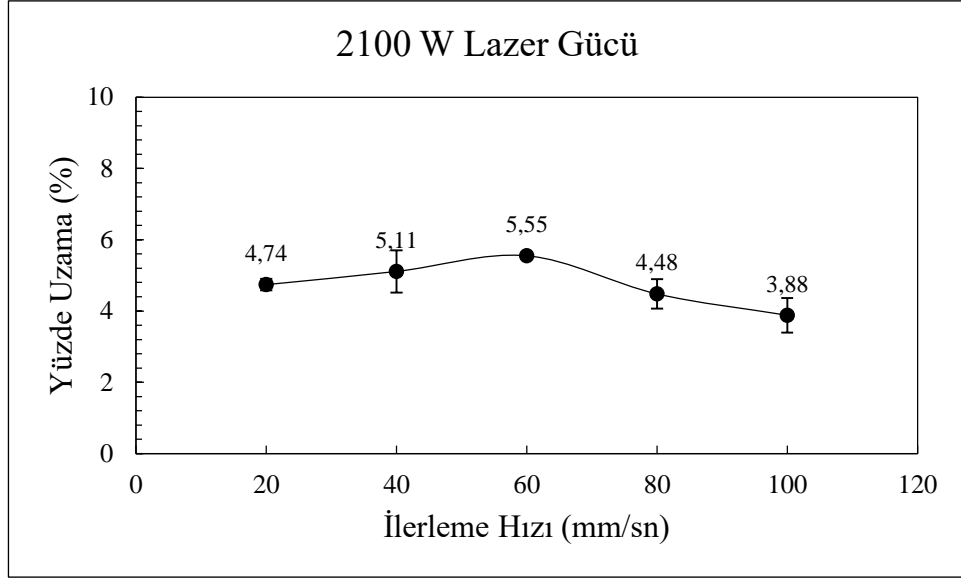
**Çizelge 4.11.** Farklı parametrelerle üretilen DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Isı Girdisi (Joule/mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Yüzde Uzama (%)	Standart Sapma	Kırılma Bölgesi
1	105	1172,4	3,1	4,74	0,16	ITAB
2	52,5	1188,8	28,2	5,11	0,59	ITAB
3	35	1240,1	4	5,55	0,04	ITAB
4	26,25	1155,2	45,7	4,48	0,41	KM
5	21	960,1	45	3,88	0,49	KM
6	25	818,1	31,5	3,41	0,21	KM
7	30	1197	5,3	5,39	0,16	ITAB
8	40	1266,5	2,1	5,84	0,10	ITAB
9	45	1234,8	17,1	6,06	0,20	ITAB

2100 W lazer gücünde 20 mm/sn ilerleme hızından 100 mm/sn ilerleme hızına kadar 20 mm/sn aralıklarla arttırılarak DP1200-DP1200 kombinasyonunda birleştirilen 1-5 kodlu numunelere ait çekme testi sonucu ilerleme hızıyla çekme mukavemetinin ve yüzde uzamanın değişimini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 4.107 ve Şekil 4.108'de gösterilmiştir. 2100 W lazer gücünde ilerleme hızı 20 mm/sn'den 60 mm/sn'ye artarken çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri artmıştır. Fakat ilerleme hızı 60 mm/sn'den 100 mm/sn'ye arttırılırken çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri düşmüştür. 2100 W lazer gücünde kaynak edilen numuneler içerisinde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri 3 kodlu numunede 60 mm/sn ilerleme hızında 1240,1 MPa ve %5,55'tir. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değeri ise 5 kodlu numunede 960,1 MPa ve %3,88'dir. 2100 W lazer gücünde ilerleme hızı 60 mm/sn'den 100 mm/sn'ye arttırıldığında çekme mukavemeti %22,6 ve yüzde uzama %30,1 azalmıştır. Kırılma bölgeleri incelendiğinde 1, 2 ve 3 kodlu numuneler ITAB'dan kırılırken, 4 ve 5 kodlu numunelerin KM'den kırılmıştır. EB'deki sertlik artışı (Şekil 4.100-Şekil 4.103) sonucu gevrekleşme 4 ve 5 kodlu numunelerdeki KM den kırılmanın ve 1-3 kodlu numunelere göre mukavemet değerindeki düşüşün sebebidir.



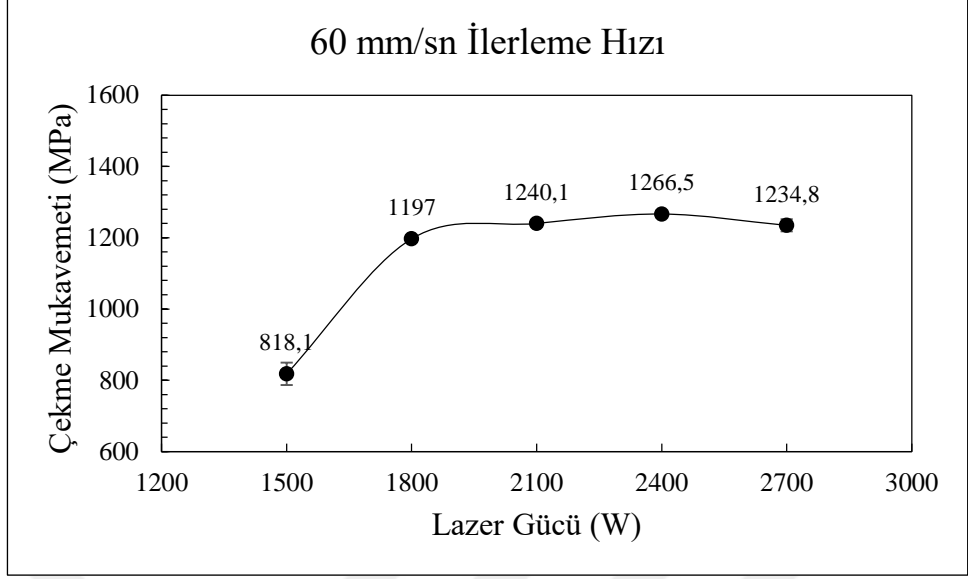
Şekil 4.107. 2100 W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi



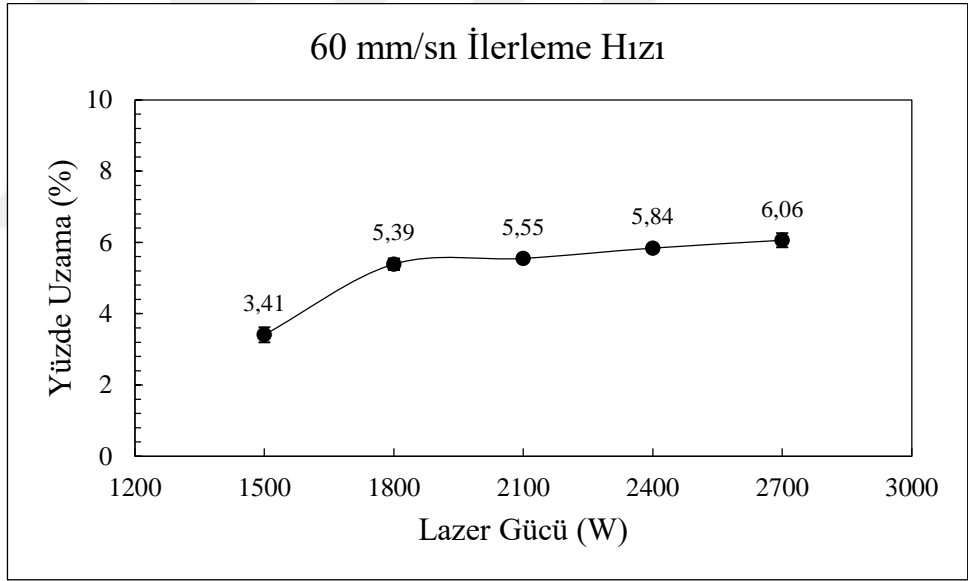
**Şekil 4.108.** 2100 W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi

DP1200-DP1200 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile sabit 60 mm/sn ilerleme hızında birleştirilen numunelerin lazer gücüyle çekme mukavemeti ve yüzde uzama değişimine ait grafikler sırasıyla Şekil 4.109 ve Şekil 4.110'da gösterilmiştir. Lazer gücü 1500 W'tan 1800 W'a yükseltildiğinde çekme mukavemeti ve yüzde uzama önemli ölçüde artmıştır. Fakat lazer gücü 1800 W'tan 2700 W'a 300 W aralıklarla yükseltirken çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinde hafif artış olmasına rağmen önemli bir değişiklik olmamıştır. Farklı lazer güçlerinde yapılan birleştirmelerde en yüksek mukavemet değeri 8 kodlu numunede 2400 W lazer gücü ve 60 mm/sn ilerleme hızında 1266,5 MPa'dır. En düşük mukavemet değeri ise 6 kodlu numunede 1500 W lazer gücü ve 60 mm/sn ilerleme hızında 818,1 MPa'dır. 60 mm/sn ilerleme hızında lazer gücünün 1500 W'tan 1800W'a yükseltilmesiyle çekme mukavemeti %46,3 ve yüzde uzama %58,1 artmıştır.





**Şekil 4.109.** 60 mm/sn ilerleme hızı için çekme mukavemetinin lazer gücü ile değişimi



**Şekil 4.110.** 60 mm/sn ilerleme hızı için yüzde uzamanın lazer gücü ile değişimi

Kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13). ANOVA sonucuna bakıldığında çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %72,1 ve %80,24 ile en çok etki eden parametre lazer gücü olmuştur. İlerleme hızının ise çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkisi sırasıyla %27,9 ve %19,76'dır.

**Çizelge 4.12.** Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	4	141239	35310	-	-	74,1
İlerleme Hızı	4	45991	11498	-	-	25,9
Kalan Hata	0	-	-			-
Toplam	8					100

**Çizelge 4.13.** Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	4	4,499	1,1248	-	-	74,9
İlerleme Hızı	4	1,599	0,3999	-	-	25,1
Kalan Hata	0	-	-			-
Toplam	8					100

#### 4.4.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

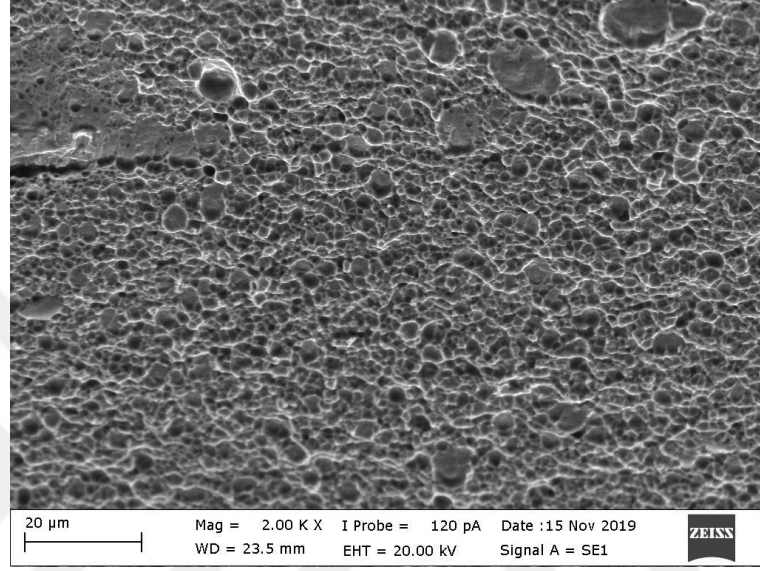
DP1200-DP1200 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile birleştirilen tüm numunelerde çekme deneyi sonrası kırılmalar kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.111). Tüm numunelerde kırılmalar kaynak bölgesinden gerçekleşmesine rağmen BM mukavemetine yakın yüksek kaynak mukavemet değerleri elde edilmiştir. 4, 5 ve 6 kodlu numunelerde mukavemet değeri diğer numunelerin biraz altında kalsa da genel itibariyle yüksek kalitede lazer kaynaklı birleştirmeler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 4, 5 ve 6 kodlu numuneler KM'den kırılırken, diğer numuneler ITAB'dan kırılmıştır.



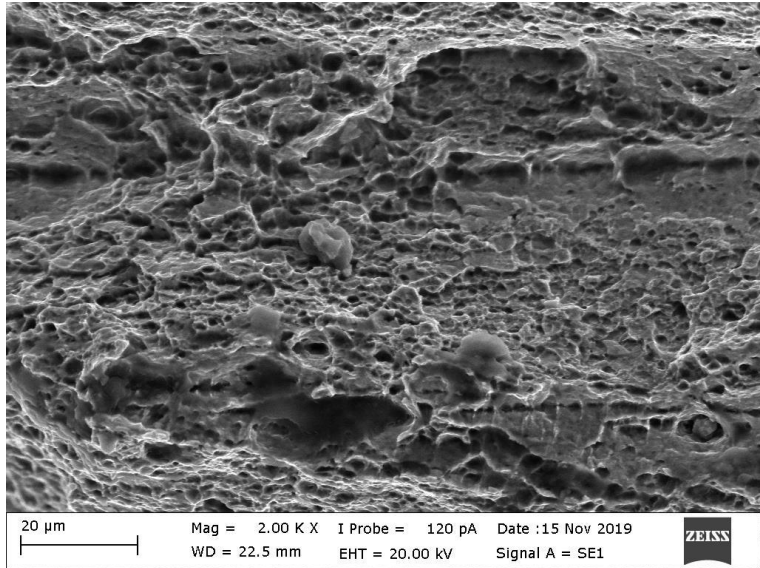
Şekil 4.111. Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler

Şekil 4.112a ve Şekil 4.112b'de DP1200-DP1200 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde sırasıyla en düşük ısı girdisine sahip 5 kodlu numune (21 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait kırılma yüzeyi

SEM görüntüleri verilmiştir. 5 kodlu numunede küçük ve sığ çukurcuklardan oluşan nispeten sünek kısımlarla birlikte ani kırılmanın gerçekleştiği gevrek kısımlar iç içedir (Şekil 4.112a). 1 kodlu numunede de ani kırılmaların gerçekleştiği gevrek kısımlar görülürken sünek kısımlar 5 kodlu numune ile kıyaslandığında girinti çıkıntılı daha büyük ve derin çukurcuklardan oluşmuştur (Şekil 4.112b).



a)



b)

**Şekil 4.112.** DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı a) 5 kodlu numune (21 joule/mm) ve b) 1 kodlu numuneye (105 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

## 4.5 Usibor1500-Usibor1500 Fiber Lazer Kaynaklı Numuneler

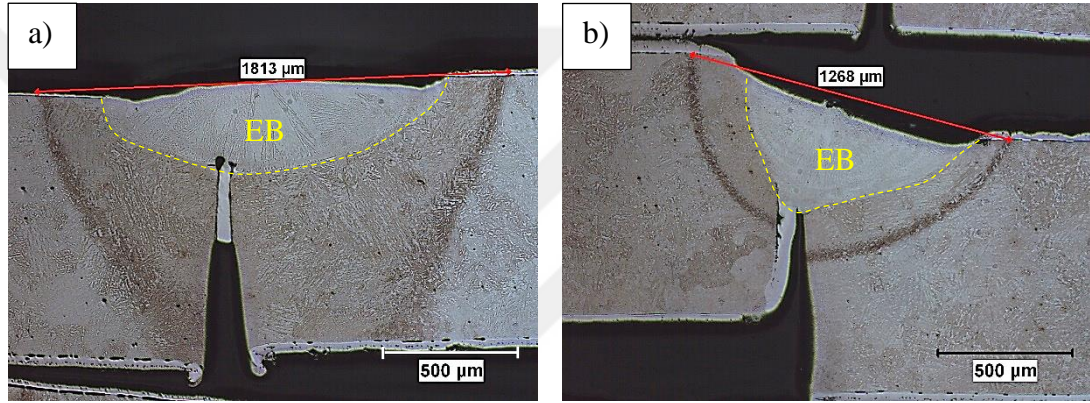
Bu bölümde Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak (Çizelge 3.7) alın altına birleştirilen 1,1 mm kalınlığındaki kaynaklı numunelerin makro yapıları, mikro yapıları, mekanik özellikleri ve kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

### 4.5.1 İçyapı İncelemeleri

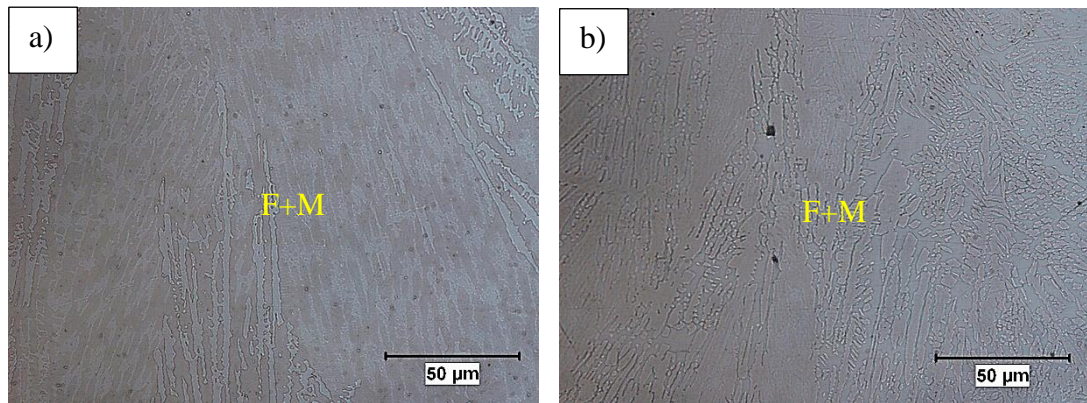
1,1 mm kalınlığında ticari olarak temin edilen Usibor1500 saclar ısıtıl işlem ile mukavemeti arttırıldıktan sonra Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda farklı lazer güçleri (1500 W, 2000W ve 3000W) ve kaynak ilerleme hızları (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) seçilerek fiber lazer kaynağı ile birleştirilmiştir. Makro yapı görüntülerinde kaynak bölgesinden genişlik ölçümleri alınmıştır. EB ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Makro yapı ve mikro yapı fotoğraflarında EB'ye Usibor1500'e özgü Al-Si kaplama tabakasının karıştığı görülmüştür. ITAB a, b, c ve d ile gösterilen bölümler sırasıyla KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB'ı ifade etmektedir. Bu farklı bölgelerden makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları alınmıştır.

Şekil 4.113-Şekil 4.115 arasında en düşük lazer gücü parametresi olan 1500 W lazer gücünde fiber lazer kaynağı ile farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) birleştirilen en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (40 mm/sn-37,5 joule/mm) ile en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numuneye (120 mm/sn-12,5 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. 1 kodlu numune 3 kodlu numunenin üç katı ısı girdisine sahiptir. Şekil 4.113a ve Şekil 4.113b'de sırasıyla 1 ve 3 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğrafları gösterilmiş ve kaynak genişlik ölçümleri yapılmıştır. 1 kodlu numunenin kaynak genişliği 1813  $\mu\text{m}$  iken 3 kodlu numunenin kaynak genişliği 1268  $\mu\text{m}$ 'dir. Her iki numunede de ısı girdisinin yetersiz kalmasından dolayı kaynak kökü birleşmemiştir. İlerleme hızı düşürülse dahi 1500 W lazer gücü esasen yetersizdir. Isı girdisinin daha yüksek olduğu 1 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre ITAB genişliğinin çok daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.113). Şekil 4.114a ve Şekil 4.114b'de EB mikro yapı fotoğrafları

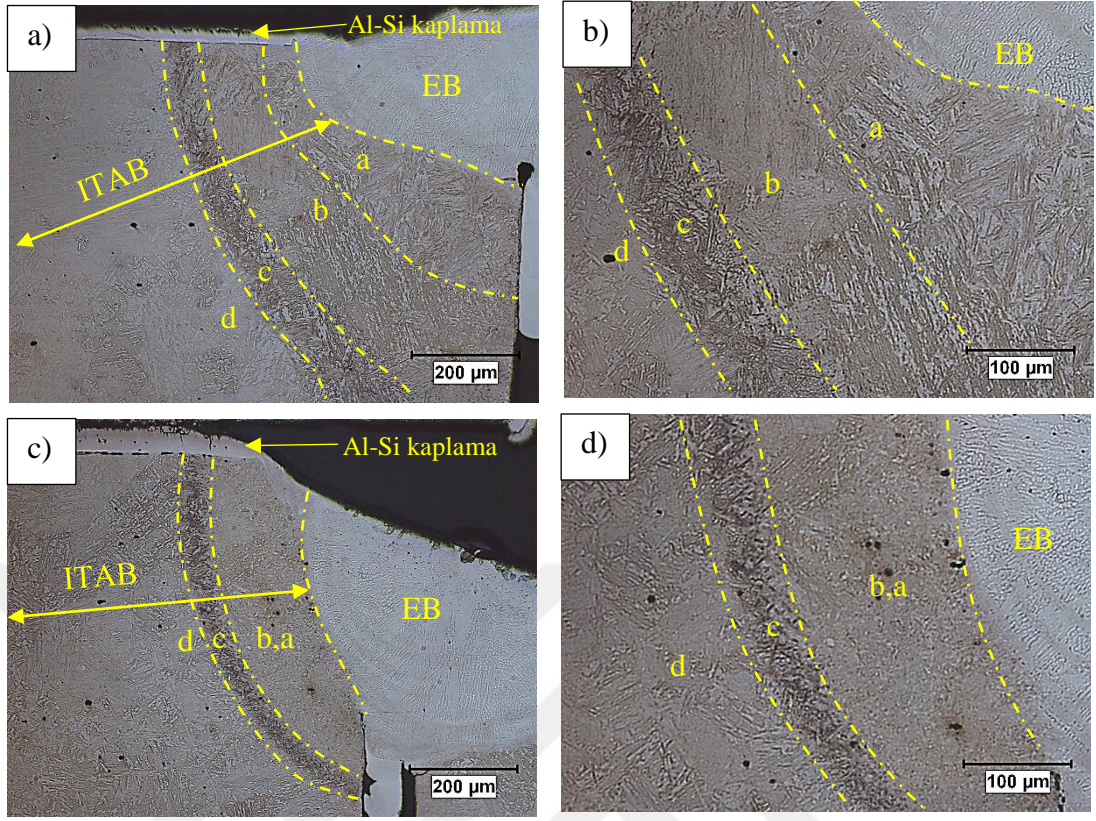
verilmiştir. Her iki numunede de EB martenzit+ferrit fazlarından oluşmaktadır. Usibor1500 kaplama tabakasındaki Al'nin EB'ye yüksek oranda karışması Usibor1500 ısı işlem görüp yüksek oranda martenzitten oluşsa dahi ısı işlem öncesi içyapıda bulunan ferritlerin mevcudiyetini korumasına neden olmuştur. 1 ve 3 kodlu numunelere ait ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.115'te gösterilmiştir. Şekil 4.115'te ITAB a, b, c ve d ile gösterilip işaretlenen bölgeler sırasıyla KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB'dır. 1 ve 3 kodlu numunelerin ÜK-ITAB'ları (a ve b ile gösterilen bölge) karşılaştırıldığında ısı girdisinin daha düşük olduğu 3 kodlu numunede daha ince lamelli martenzitten oluşan bir içyapı görülmektedir (Şekil 4.115).



**Şekil 4.113.** a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn-37,5 joule/mm) ve b) 3 kodlu numuneye (1500 W, 120 mm/sn-12-5 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



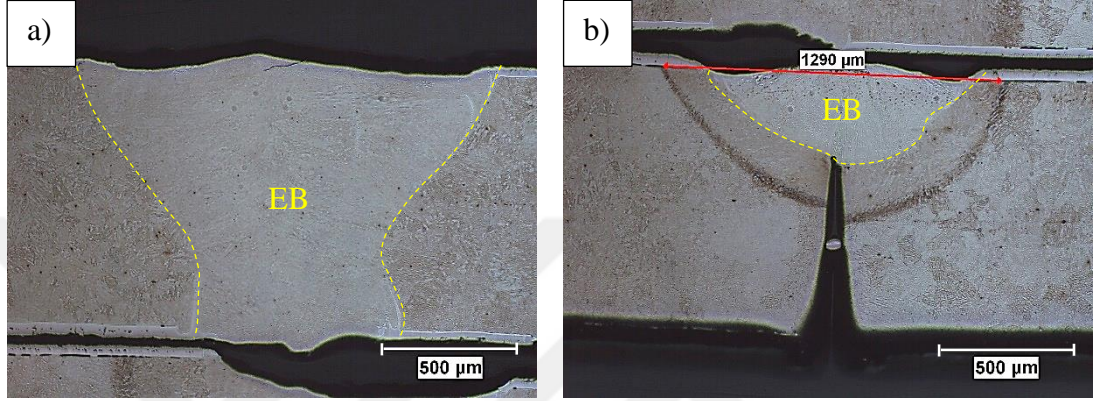
**Şekil 4.114.** a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn) ve b) 3 kodlu numuneye (1500 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri



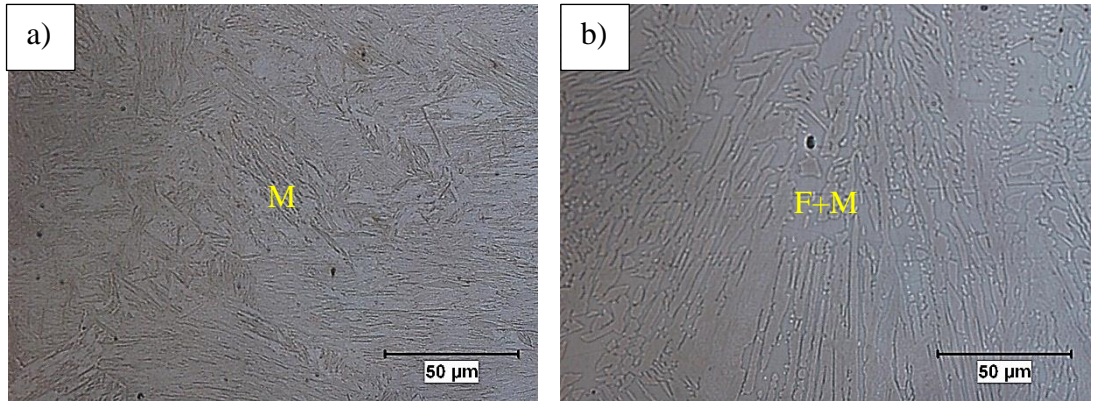
**Şekil 4.115.** a) 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 1 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 3 kodlu numune (1500 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 3 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

2000 W lazer gücünde fiber lazer kaynağı ile farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) birleştirilen ve en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (40 mm/sn-50 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu numuneye (120 mm/sn-16,7 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.116-Şekil 4.118 arasında gösterilmiştir. 4 kodlu numunenin ısı girdisi 6 kodlu numunenin ısı girdisinin üç katıdır. Şekil 4.116a ve Şekil 4.116b’de sırasıyla 4 ve 6 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Isı girdisinin daha yüksek olduğu 4 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme gerçekleşirken, 6 kodlu numunede ısı girdisi yetersiz kalmış ve kaynak kökü birleşmemiştir. Şekil 4.117a ve Şekil 4.117b’de EB mikro yapıları gösterilmiştir. 4 kodlu numunede EB genel itibariyle martenzitten oluşurken, 6 kodlu numune EB’si martenzit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. 6 kodlu numunede düşük bir hacimde oluşan EB’de Al oranının 4 kodlu numuneye göre daha yüksek olması EB’de ferrit fazının da mevcudiyetinin sebebidir.

Şekil 4.118’de 4 ve 6 kodlu numunelerin ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. ITAB görüntülerinde farklı bölgeler işaretlenmiştir. Özellikle ısı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunenin KT-ITAB’ında martenzit lamelleri kalınlaşırken, 6 kodlu numunenin ITAB’ında ısı girdisinin daha düşük olması sebebiyle daha ince lamelli martenzitik bir yapı ortaya çıkmıştır.

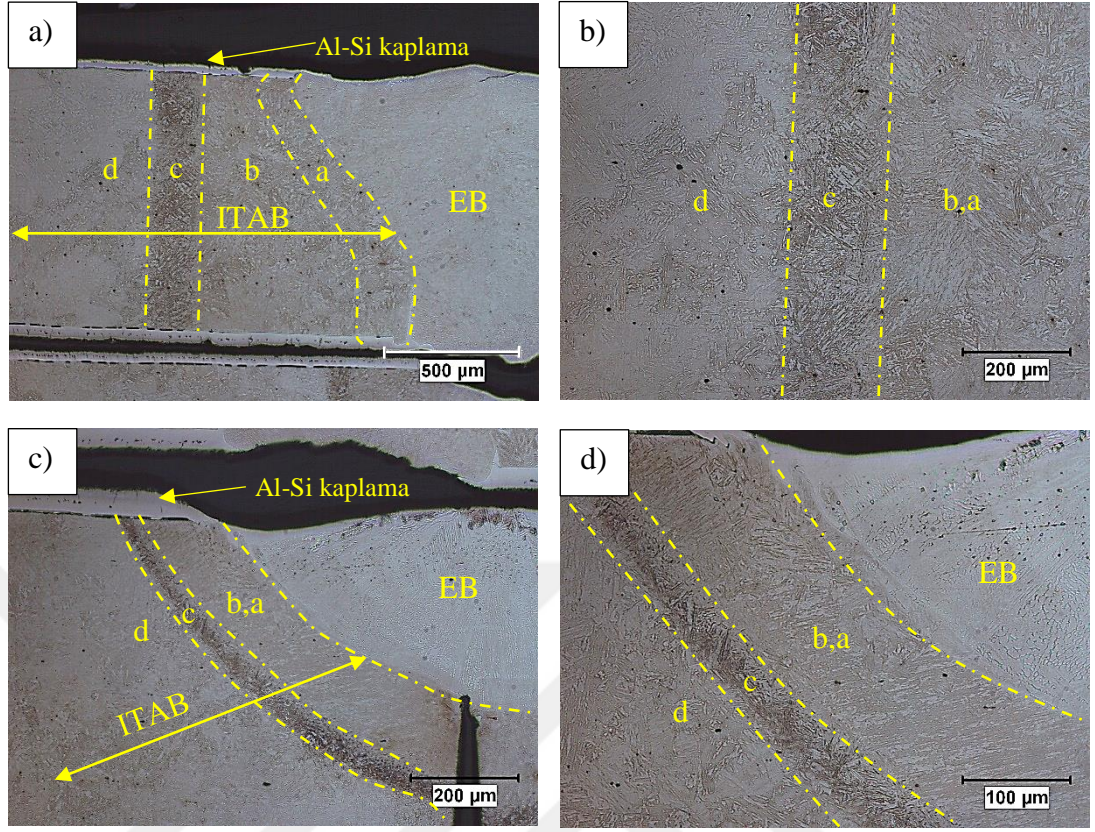


Şekil 4.116. a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn-50 joule/mm) ve b) 6 kodlu numuneye (2000 W, 120 mm/sn-16,7 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



Şekil 4.117. a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn) ve b) 6 kodlu numuneye (2000 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri

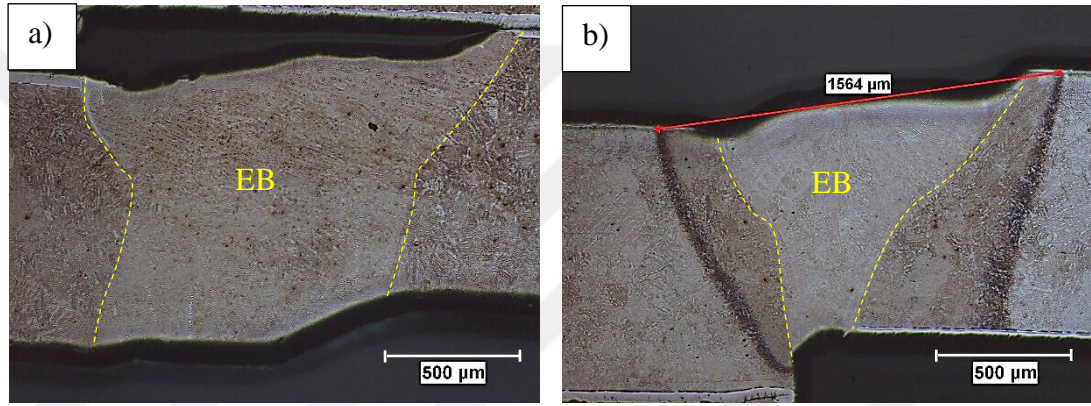




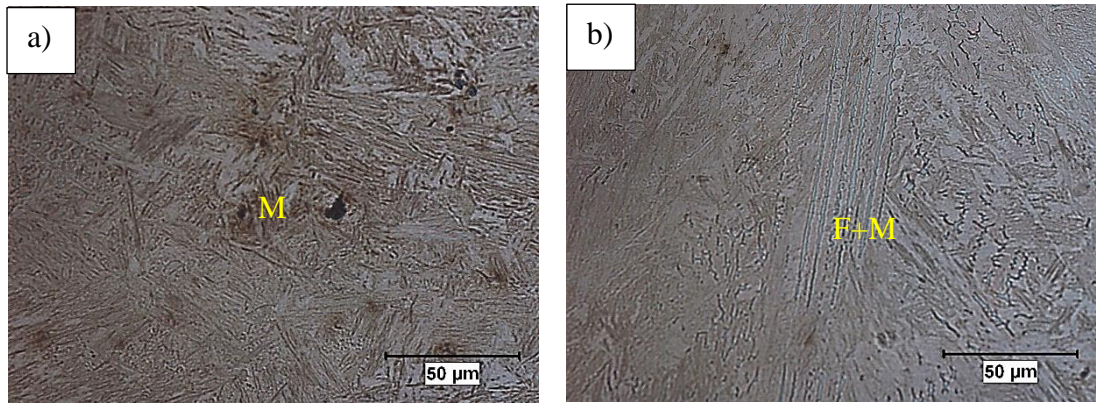
**Şekil 4.118.** a) 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 4 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 6 kodlu numune (2000 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 6 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı birleştirmeler içerisinde en yüksek lazer gücü parametresi olan 2500 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn ile birleştirilen ve en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numune (40 mm/sn-62,5 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numuneye (120 mm/sn-20,8 joule/mm) ait kaynak bölgesi makro yapı, EB mikro yapı ve ITAB mikro yapı fotoğrafları Şekil 4.119-Şekil 4.121 arasında gösterilmiştir. 7 kodlu numunenin ısı girdisi 9 kodlu numunenin ısı girdisinin üç katıdır. Şekil 4.119a ve Şekil 4.119b’de sırasıyla 7 ve 9 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. Tüm numuneler içerisinde en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numunede kaynak kökünde birleşme gerçekleşirken, 9 kodlu numunede kaynak kökünde birleşmeyen kısım vardır. Şekil 4.120a ve Şekil 4.120b’de EB mikro yapıları gösterilmiştir. 7 kodlu numunede EB genel itibariyle martenzitten oluşurken, 9 kodlu numunede ferrit+martenzit fazlarından

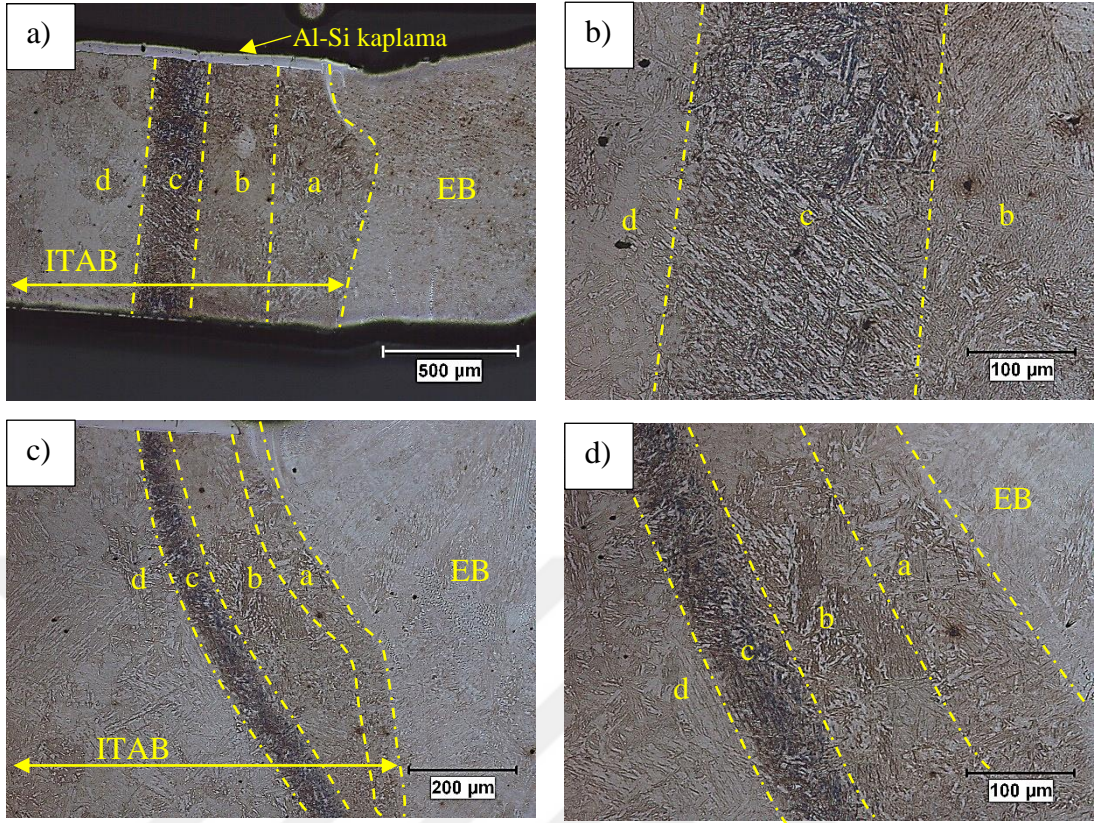
oluşmaktadır. 9 kodlu numunede düşük hacimde oluşan EB’de Al oranının nispeten yüksek olmasından kaynaklı ferrit oluşumu da gerçekleşmiştir. Şekil 4.121’de 7 ve 9 kodlu numunelerin ITAB makro yapı ve mikro yapı fotoğrafları gösterilmiştir. 9 kodlu numunede a ve b ile gösterilen KT-ITAB ve İT-ITAB bölgelerinde ısı girdisinin düşük olması sebebiyle daha ince lamelli martenzit oluşumu gerçekleşmiştir (Şekil 4.121b,d). Ayrıca özellikle 6 kodlu numunede ısı girdisinin çok yüksek olmasından dolayı d ile gösterilen AK-ITAB’ta 9 kodlu numuneye göre tane irileşmesi dikkat çekicidir (Şekil 4.121).



**Şekil 4.119.** a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn-62,5 joule/mm) ve b) 9 kodlu numuneye (2500 W, 120 mm/sn-20,8 joule/mm) ait makro yapı görüntüleri



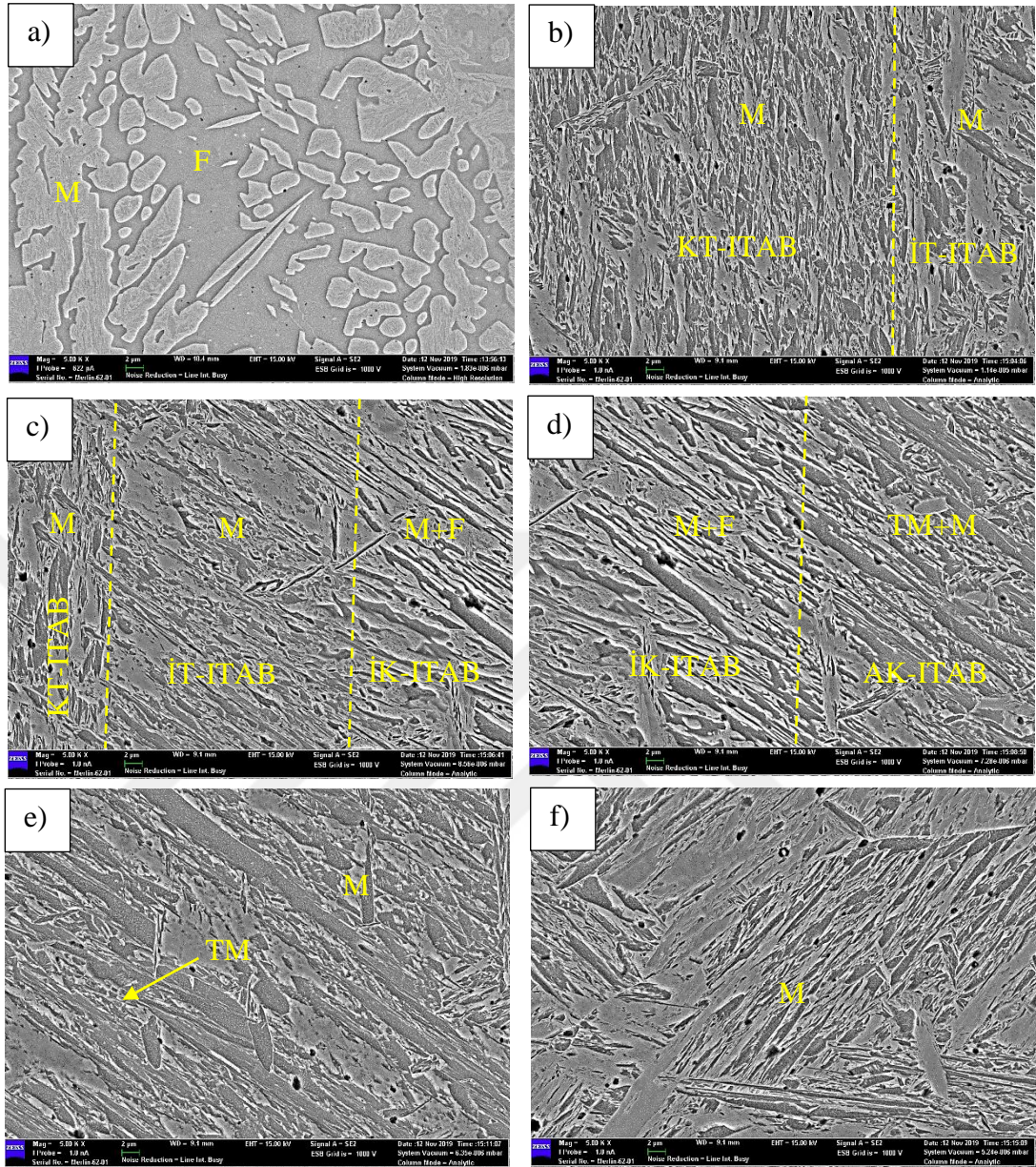
**Şekil 4.120.** a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn) ve b) 9 kodlu numuneye (2500 W, 120 mm/sn) ait EB mikro yapı görüntüleri



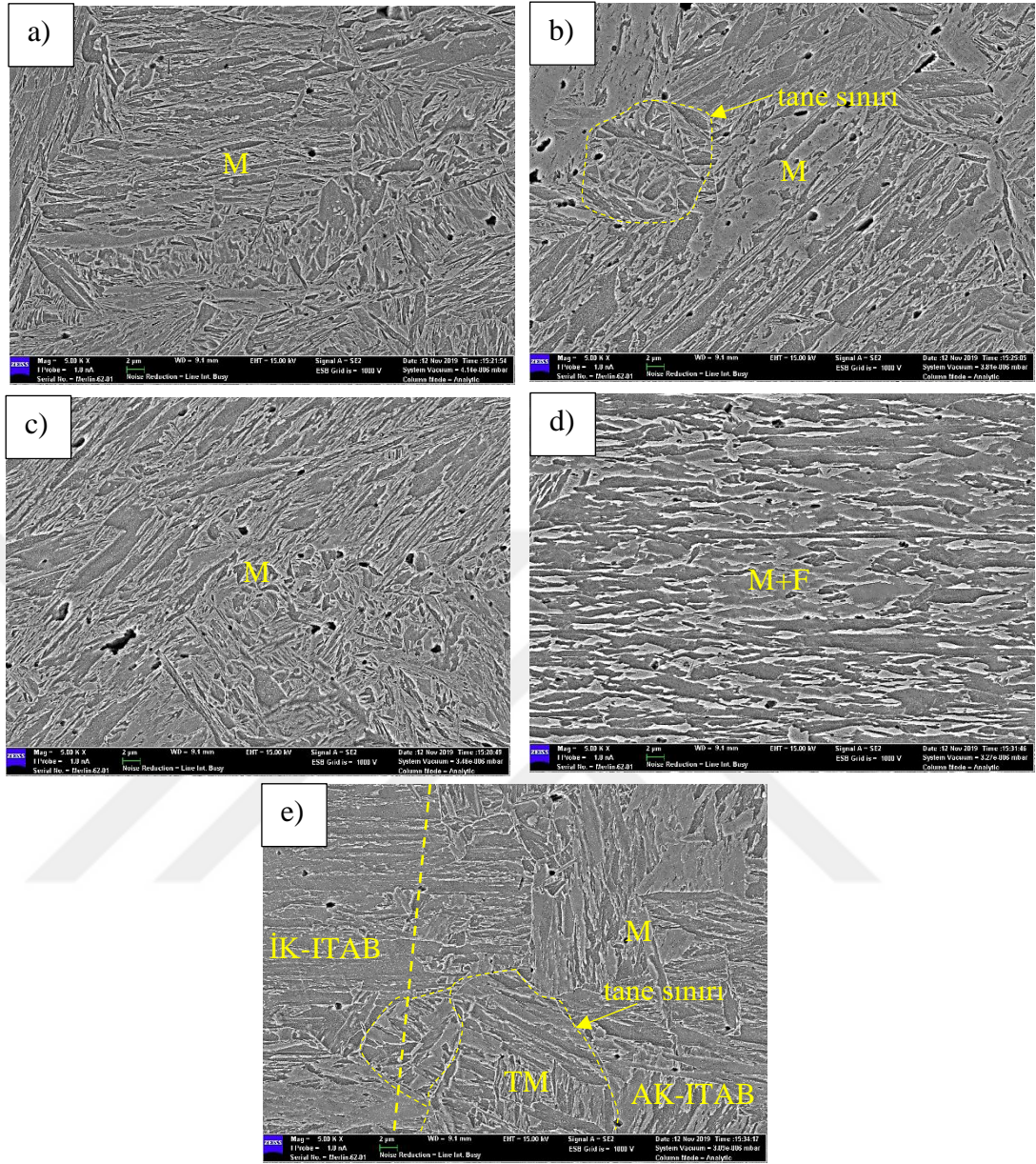
**Şekil 4.121.** a) 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn) ITAB makro yapı, b) 7 kodlu numune ITAB mikro yapı, c) 9 kodlu numune (2500 W, 120 mm/sn) ITAB makro yapı ve d) 9 kodlu numune ITAB mikro yapı görüntüleri

Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilen numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (12,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait Şekil 4.122 ve Şekil 4.123'te işaretlenen EB, KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB, AK-ITAB ve BM SEM fotoğrafları Şekil 4.122 ve Şekil 4.123'te gösterilmiştir. 3 ve 7 kodlu numunelerin EB'leri incelendiğinde ısı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede martenzit ve ferrit fazları bulunurken, ısı girdisinin yüksek olduğu 7 kodlu numunede içyapının genel itibariyle martenzit fazından oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.122a ve Şekil 4.123a). 3 ve 7 kodlu numunelerde KT-ITAB ve İT-ITAB genel itibariyle martenzitik içyapıya sahiptir (Şekil 4.122b,c ve Şekil 4.123b,c). Isı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunede özellikle KT-ITAB'da yüksek bölgesel sıcaklıklara maruz kalmasından dolayı tane irileşmesi ve martenzit çubuklarının kalınlaşması söz konusudur (Şekil 4.123b). 3 kodlu

numunenin KT-ITAB ve İT-ITAB'ında martenzit çubuklarının farklı yöne yönelmesi bölgeler arasındaki geçişi Şekil 4.122c'de net bir şekilde belirginleştirmiştir. 3 ve 7 kodlu numunelerde İK-ITAB bölgeleri genel itibariyle ferrit+martenzit içyapısına sahiptir (Şekil 4.122d ve Şekil 4.123d). 3 kodlu numunede AK-ITAB'da BM içyapısında bulunan martenzitin temperlenerek temperlenmiş martenzite dönüşmesi Şekil 4.122d,e'de görülmektedir. 7 kodlu numunede ise AK-ITAB'da yüksek ısı girdisi daha şiddetli etki yaparak tane irileşmesine (önceki ostenit taneleri (prior austenite grains)) sebep olmuştur (Şekil 4.123). Ayrıca Usibor1500 çeliğinin genel itibariyle martenzitten oluşan içyapısı Şekil 4.122f'de gösterilmiştir. Jia ve ark. (2018) 1,3 mm kalınlığında QP980 çeliği ve 1,2 mm kalınlığında B1500HS çeliğini fiber lazer kaynağı ile alın altına birleştirip mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında kaynak bölgesinde B1500HS'nin ÜK-ITAB ve İK-ITAB'larında EDX ölçümlerinde sırasıyla %0,9 ve %3,4 kalıntı ostenit tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek sayılabilecek C içeriğine sahip B1500HS çeliğinin AK-ITAB'ında temperlenmiş martenzit oluşumu sertlikte büyük bir düşüşe neden olmuştur. Kalıntı ostenit içyapılarının bu tez kapsamında da İK-ITAB ve AK-ITAB bölgelerinde olduğu ve sertlikteki büyük düşüşteki bir nedeninin de bu olduğu düşünülmektedir.

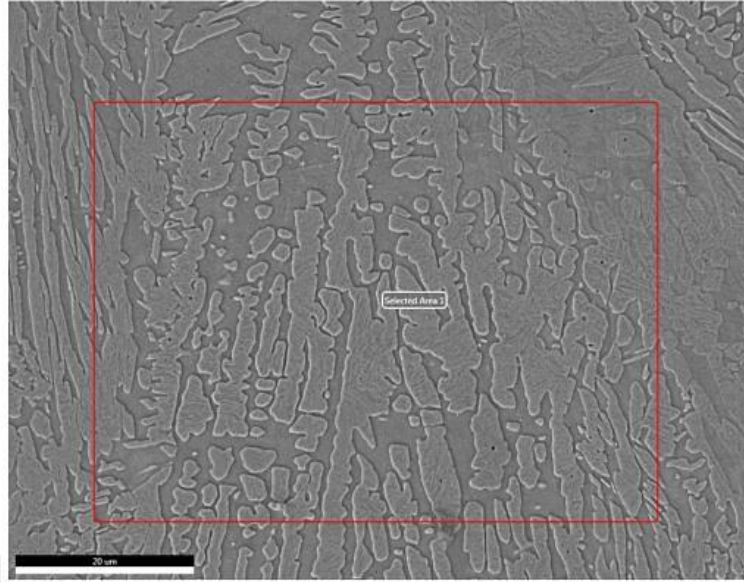


**Şekil 4.122.** Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (12,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-ITAB, c) İT-ITAB, d) İK-ITAB, e) AK-ITAB ve f) BM SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit)

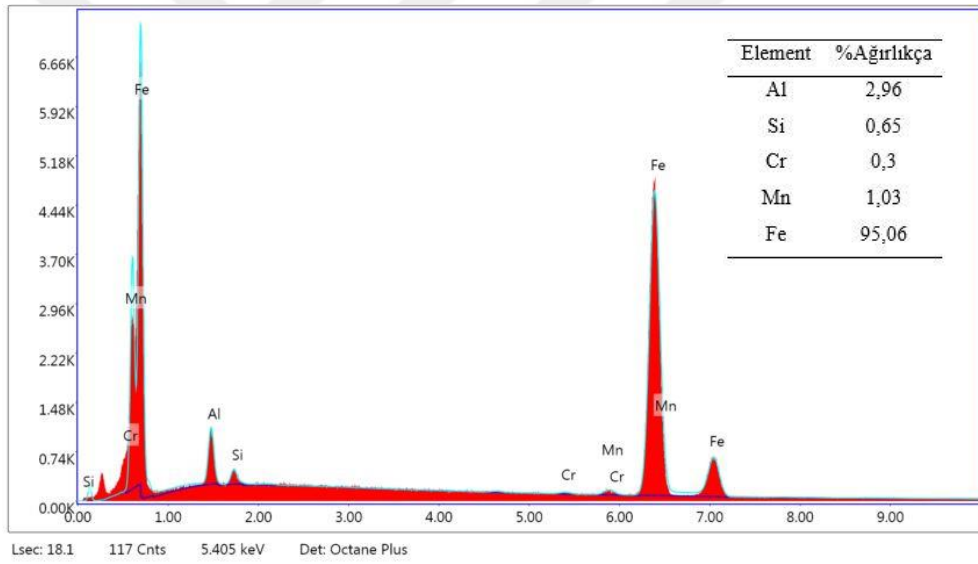


**Şekil 4.123.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait a) EB, b) KT-İTAB, c) İT-İTAB, d) İK-İTAB ve e) AK-İTAB SEM görüntüleri (M: Martenzit, TM: Temperlenmiş Martenzit, F: Ferrit, B: Beynit)

Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu ve ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunelerin ITAB'larında benzer mikro yapı özellikleri görülmesine rağmen bu numunelerin EB mikro yapıları farklıdır. 3 kodlu numunenin EB'si ferrit ve martenzit fazlarından oluşurken 7 kodlu numunenin EB'si tamamen martenzitten oluşan bir içyapıya sahiptir. EB içyapı farklılıklarını daha iyi anlayabilmek ve açıklayabilmek için iki numunenin de EB'sinde seçili bölgelerde SEM-EDX (Energy Dispersive X-Ray Analysis) analizleri yapılmıştır (Şekil 4.124 ve Şekil 4.125). SEM-EDX sonuçlarında ağırlıkça Al oranındaki yüksek değerler göze çarpmaktadır. Özellikle ısı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede ağırlıkça Al oranı %2,96 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 7 kodlu numunede ağırlıkça Al oranı %1,29'dur. 3 kodlu numunede ısı girdisi daha düşük olduğu ve kaynaklı bölgenin hacmi daha az olduğu için Al oranı daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde 3 kodlu numunede Si oranı 0,65 iken 7 kodlu numunede 0,3 ile sınırlı kalmıştır. Daha önceki çalışmalarda Al içeriği ağırlıkça %1,2'nin üzerinde olduğunda, ferritten ostenite dönüşümün engellendiği, bunun yerine ferrit fazının stabilize edildiği ve kaynak işleminin sonuna kadar bu şekilde devam ettiği bildirilmiştir (Di ve ark. 2017, Society 2016, Sun ve ark. 2019). Bu çalışmada da benzer bir etki gözlenmiştir. Al oranının ağırlıkça %2,96 olduğu 3 kodlu numunede EB'de Al oranının yüksek oluşu yapıda bulunabilecek ferrit fazını stabilize etmiş ve ostenite dönüşümünü engellemiştir.



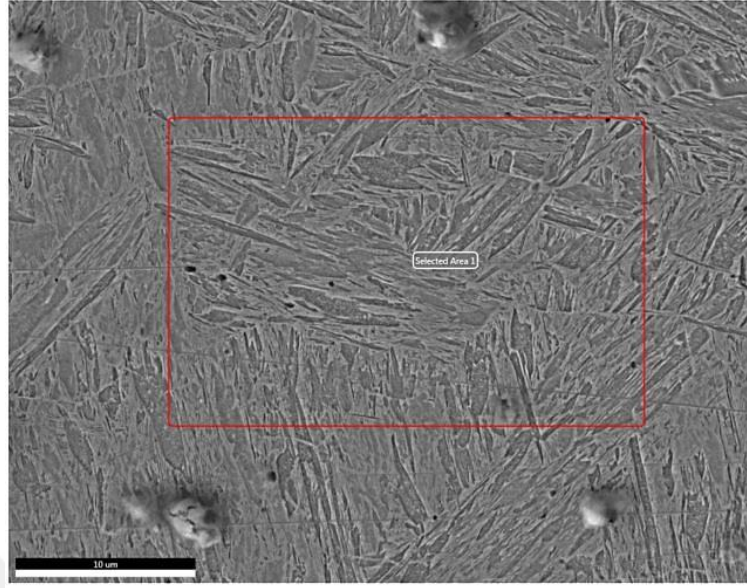
a)



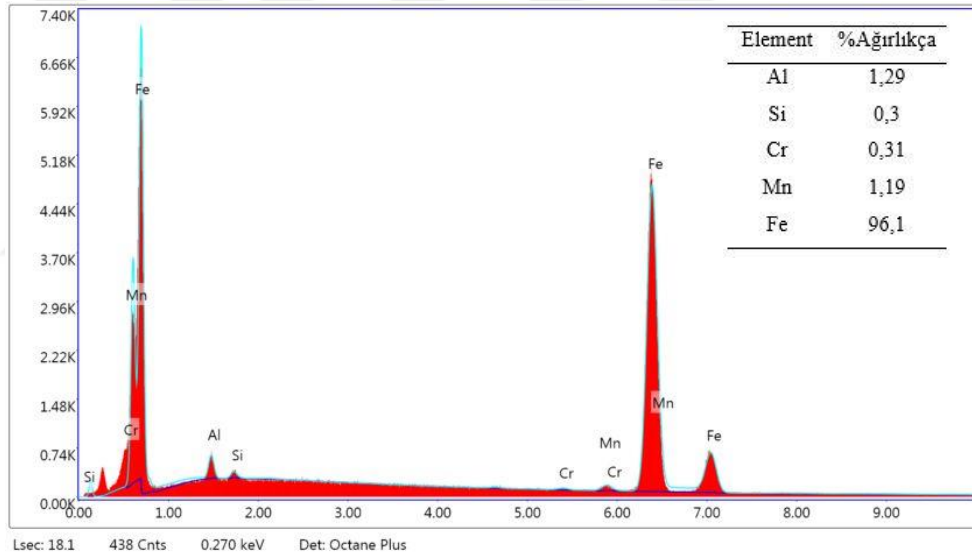
b)

**Şekil 4.124.** 3 kodlu numunenin (12,5 joule/mm) EB'sine ait a) EDX tarama bölgesi b) EDX analiz sonucu





a)

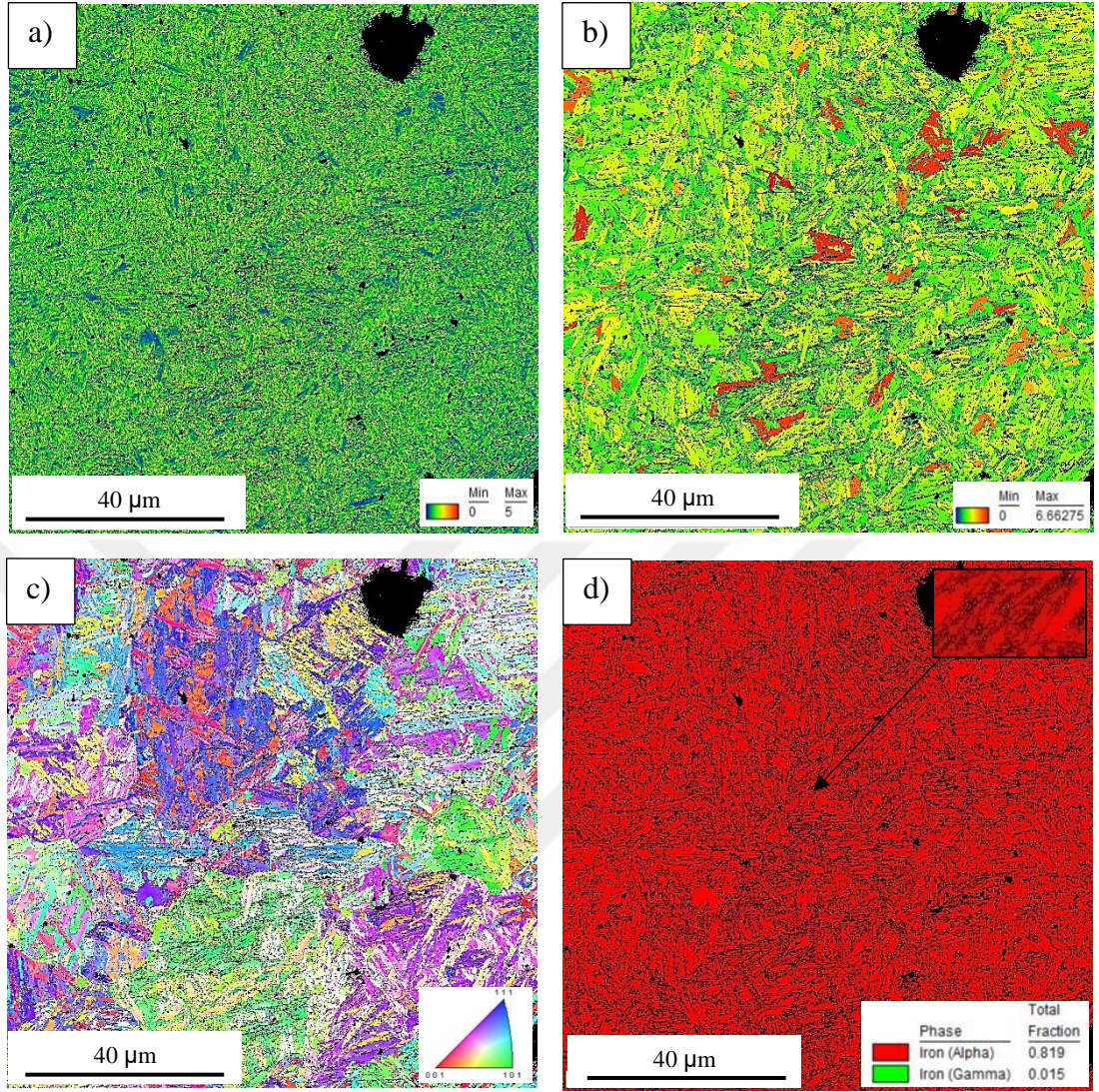


b)

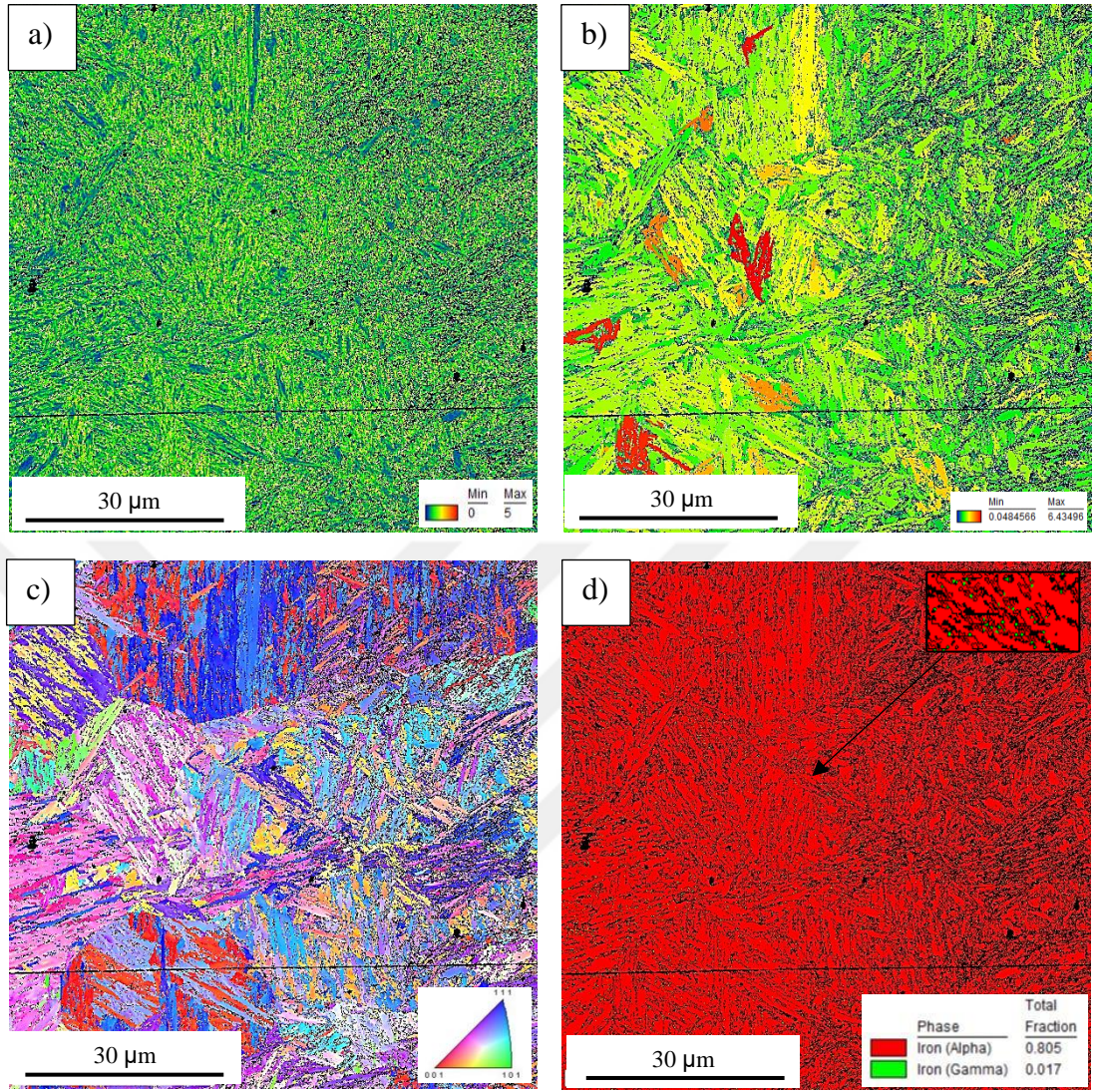
**Şekil 4.125.** 7 kodlu numunenin (62,5 joule/mm) EB'sine ait a) EDX tarama bölgesi b) EDX analiz sonucu

Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı numunelerden en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu numuneye ait kaynak bölgesinden BM'ye geçişi gösteren EBSD analiz sonuçları Şekil 4.126-Şekil 4.128'de verilmiştir. 3 ve 7 kodlu numunelere ait KAM haritası, GOS haritası, IPF haritası

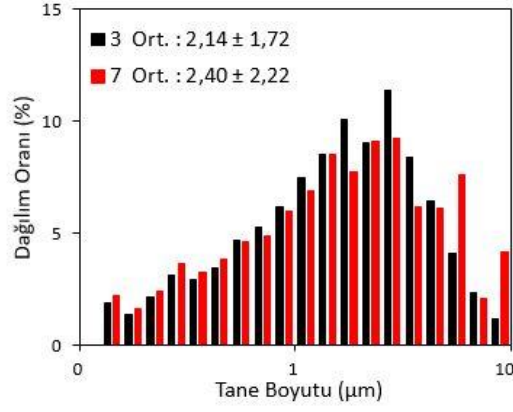
ve faz haritaları Şekil 4.126 ve Şekil 4.127'de gösterilmiştir. KAM haritalarında düşük açılı mavi kısımlar ferrit bölgelerini göstermektedir. Her iki numunede de ferritin dengeli dağılımı görülmektedir (Şekil 4.126a ve Şekil 4.127a). KAM açısı dağılımları incelendiğinde de 3 kodlu numunede KAM açısı ortalaması 1,26 iken 7 kodlu numune KAM açısı ortalaması 1,23'tür. Kam açısı dağılımlarında ve ortalamalarında benzer sonuçlar görülmektedir. 3 ve 7 kodlu numunelere ait GOS haritaları Şekil 4.126b ve Şekil 4.127b'de gösterilmiştir. GOS haritalarında sarı rengin yoğunlukta olduğu görülmektedir. GOS açısı dağılımı da incelendiğinde özellikle 1,5°-3° arasında yığılmanın olduğu görülmektedir (Şekil 4.128c). 3 kodlu numunede 1,5°-3° arasında GOS açısı dağılımı %68,9 iken 7 kodlu numunede 1,5°-3° arasındaki GOS açısı dağılımı %69,9'dur. 1,5°-3° arasındaki yüksek GOS oranı içyapının genel itibariyle beynitik olduğunun işaretidir. 3 ve 7 kodlu numunelere ait IPF haritaları Şekil 4.126c ve Şekil 4.127c'de gösterilmiştir. IPF haritalarında ısı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre daha büyük taneler (prior austenite grains) görülmektedir. Şekil 4.128a'da seçili bölgeler için tane boyutu dağılımı gösterilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede tane boyutu 2,14 µm iken ısı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunede tane boyutu 2,40µm'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte tane boyutu da artmıştır. 3 ve 7 kodlu numunelerin her ikisinde de tane boyutu 1,14 µm ila 8,91 µm arasında değişmiştir. Fakat ısı girdisinin yüksek olduğu 7 kodlu numunede 8,91 µm tane boyutunun oranı %4,2 iken ısı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede 8,91 µm tane boyutunun oranı %1,2'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte iri tanelerin miktarı artmıştır. 3 ve 7 kodlu numunelere ait faz haritaları Şekil 4.126d ve Şekil 4.127d'de gösterilmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede ostenit miktarı %1,5 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 7 kodlu numunede ostenit miktarı %1,7'dir. Ostenit oranlarında önemli bir fark olmasa da ısı girdisinin daha yüksek olduğu 7 kodlu numunede ostenit boyutunun 3 kodlu numuneye göre irileştiği görülmektedir (Şekil 4.126d ve Şekil 4.127d).



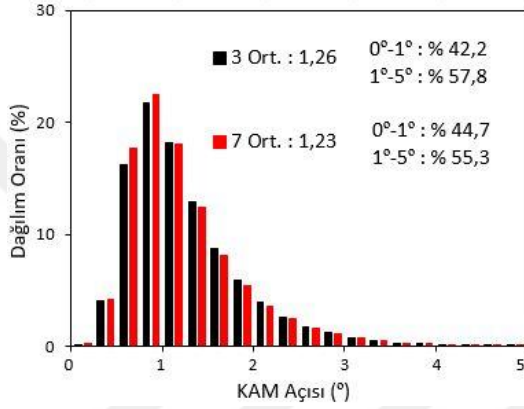
**Şekil 4.126.** Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numuneye (17,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



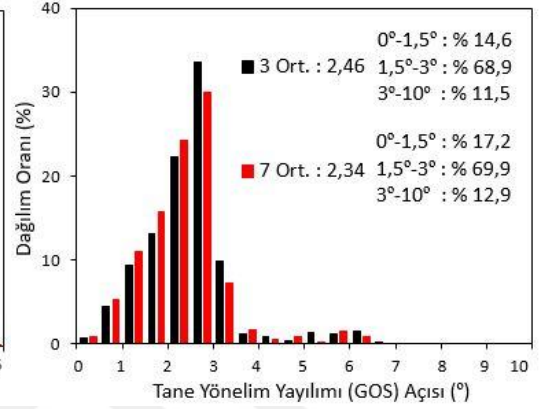
**Şekil 4.127.** Isı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait a) KAM haritası, b) GOS haritası, c) IPF haritası ve d) Faz haritası



a)



b)



c)

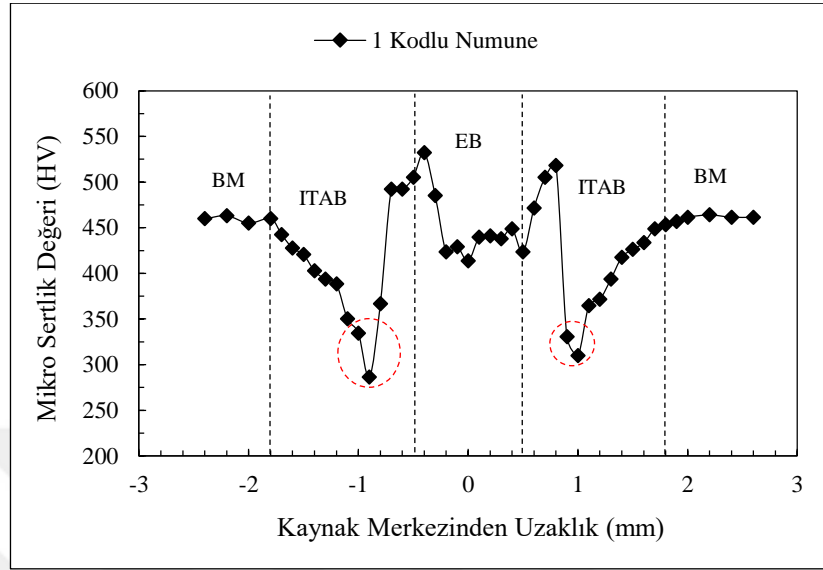
**Şekil 4.128.** 3 kodlu (17,5 joule/mm) ve 7 kodlu (62,5 joule/mm) numunelere ait a) Tane boyutu dağılımı, b) KAM açısı dağılımı ve c) GOS açısı dağılımı

#### 4.5.2 Mikro Sertlik Ölçümleri

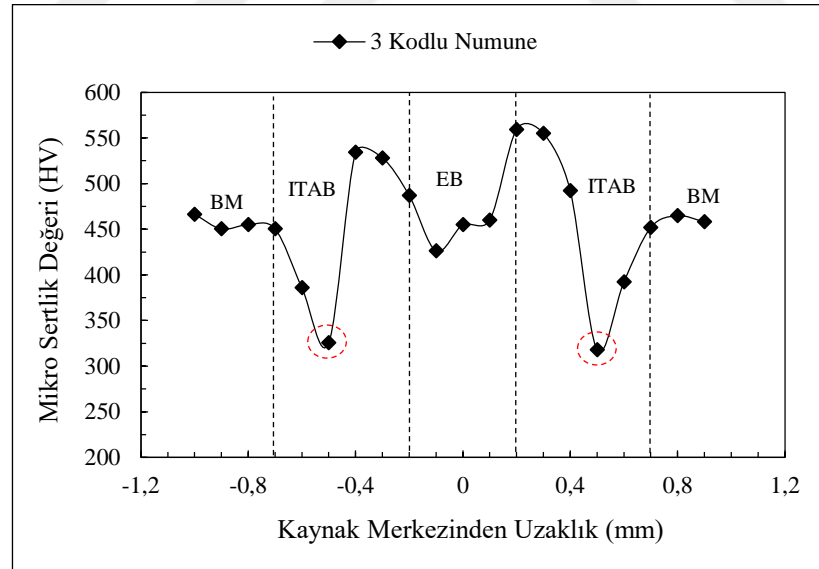
Bu bölümde fiber lazer kaynağı ile Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda birleştirilen numunelerin kaynak penetrasyon derinliğinin ortasında geçen yatay bir hat boyunca 0,1 mm aralıklar ile ölçülen mikro sertlik sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır. Mikro sertlik grafiklerinde farklı bölgelere ait sınırlar belirlenirken sertlik izi bırakıldıktan sonra çekilen makro yapı görüntülerinden de yararlanılmıştır.

Şekil 4.129 ve Şekil 4.130'da fiber lazer ile 1500 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda birleştirilen numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu (37,5 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu (12,5 joule/sn) numunelere ait mikro sertlik ölçüm sonuçları gösterilmiştir. 1 ve 3 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1 mm ve 0,4 mm'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte EB genişliğindeki artış Şekil 4.113'teki 1 ve 3 kodlu numunelere ait makro yapı fotoğrafında da görülmektedir. 1 kodlu numunenin EB'sinde ölçülen ortalama mikro sertlik değerleri 450 HV<sub>0,2</sub> iken 3 kodlu numunenin EB'sinde ölçülen ortalama mikro sertlik değerleri 447 HV<sub>0,2</sub>'dir. Isı girdisindeki artışla birlikte EB ortalama mikro sertlik değerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. İki numunenin de EB'si ferrit ve martenzit fazlarından oluşmuştur (Şekil 4.114). 1 ve 3 kodlu numunelerin EB'sinde ölçülen sertlik değerleri EB'de oluşan yumuşak ferrit fazından dolayı KT-ITAB bölgesi sertliğinden daha düşüktür. 1 kodlu numune (286,2 HV<sub>0,2</sub>) ve 3 kodlu numunenin (318 HV<sub>0,2</sub>) ITAB'ında BM sertlik değerinden (460±5 HV<sub>0,2</sub>) çok daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 3 kodlu numunede yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %30,87 iken 1 kodlu numune yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %37,78 düşmüştür. 1 kodlu numunede ısı girdisinin 3 kodlu numuneye göre daha fazla olması AK-ITAB yumuşama bölgesinde BM içyapısında yüksek oranda bulunan martenzitin daha fazla temperlenmesine ve tane irileşmesine neden olmuştur. ITAB genişliği 1 kodlu numunede 1,3 mm iken 3 kodlu numunelerde 0,5 mm'dir. Isı girdisindeki artış ITAB genişliğinin 1 kodlu numunede 3 kodlu numuneye göre önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. 3 kodlu numunenin ısı girdisi yüksek kaynak penetrasyon derinliğine

ulaşılabilmesi için çok düşük kalmıştır. Bu sebeple çok düşük EB genişlikleri ve ITAB genişlikleri bu numunede ölçülmüştür.



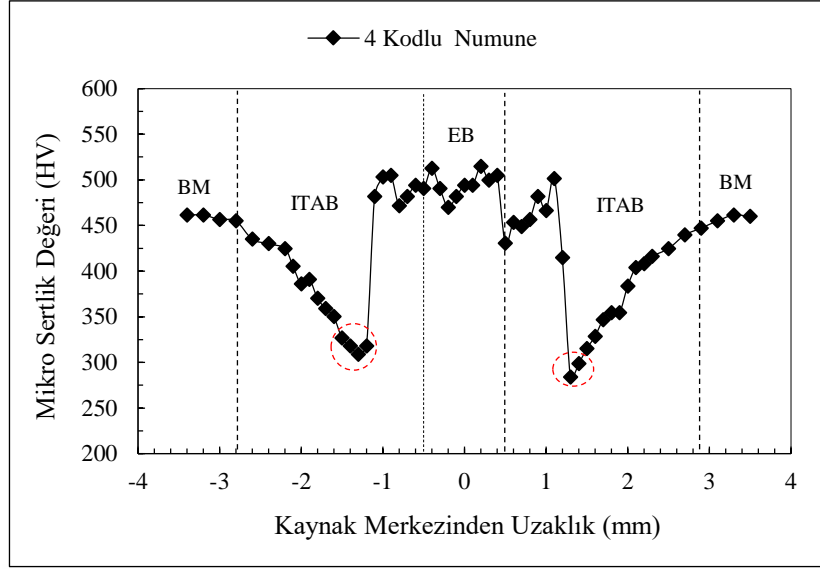
Şekil 4.129. 1 kodlu numune (1500 W, 40 mm/sn-37,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



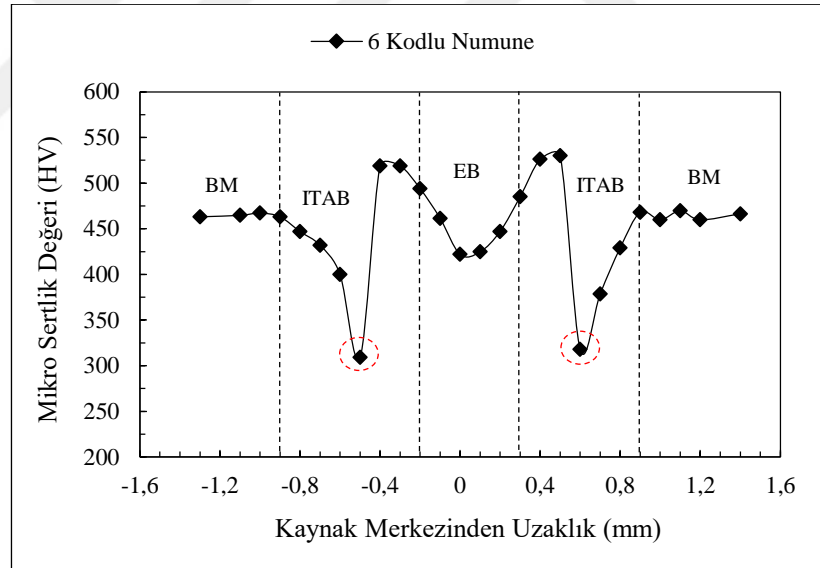
Şekil 4.130. 3 kodlu numune (1500 W, 120 mm/sn-12,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Fiber lazer kaynağı ile 2000 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) kombinasyonunda birleştirilen Usibor1500 numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu (50 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 6 kodlu (16,7 joule/mm) numunelere ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.131 ve Şekil 4.132’de gösterilmiştir. 4 ve 6 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1 mm ve 0,5 mm’dir. 6 kodlu numunede EB genişliği ısı girdisinin düşük olmasından dolayı dar kalmıştır. 4 kodlu numunenin EB’sinde ortalama mikro sertlik değerleri 496 HV<sub>0,2</sub> iken 6 kodlu numunenin EB’sinde ortalama mikro sertlik değerleri 439 HV<sub>0,2</sub>’dir. 6 kodlu numunenin EB’sinde ferrit mevcudiyeti EB sertlik değerinin 4 kodlu numuneye göre düşük olmasının nedenidir. 6 kodlu numune EB’si martenzit ve ferrit fazlarından oluşurken 4 kodlu numunenin EB’si genel itibariyle martenzit fazına sahipti (Şekil 4.117). 4 kodlu numune ITAB (283,8 HV<sub>0,2</sub>) ve 6 kodlu numune ITAB’ında (309,1 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (460±5 HV<sub>0,2</sub>) çok daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 6 kodlu numunede yumuşama bölgesinde (AK-ITAB) BM’ye göre mikro sertlik düşüşü %32,8 iken 4 kodlu numune yumuşama bölgesinde (AK-ITAB) BM’ye göre mikro sertlik %38,3 düşmüştür. 4 kodlu numunede ısı girdisinin 6 kodlu numuneye göre daha fazla olması sebebiyle AK-ITAB’ında A<sub>1</sub> sıcaklığının altındaki sıcaklığa daha fazla maruz kalmış ve BM içyapısındaki martenzit daha fazla temperlenmiştir. Aynı zamanda ısı girdisinin fazla olması içyapıdaki kalıntı ostenit miktarını da arttırmıştır. Bu da yumuşama bölgesinde sertlik düşüşünün daha şiddetli olmasının sebeplerindedir. ITAB genişliği 4 kodlu numunede 2,3 mm iken 6 kodlu numunede 0,7 mm’dir. 4 kodlu numunede daha yüksek ısı girdisi ITAB genişliğinin artışında etkili olmuştur. BM içyapısının tamamen martenzitten oluşması ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin yüksek olmasında etkili olmuştur.





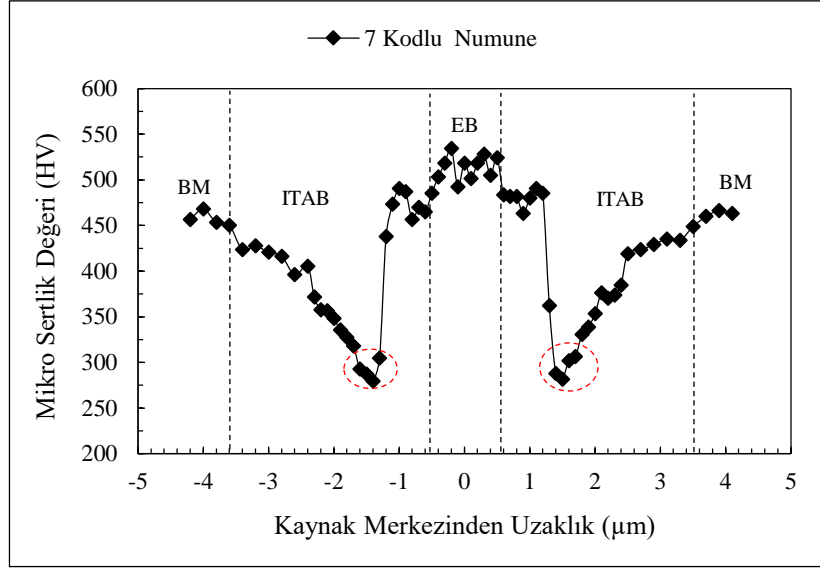
**Şekil 4.131.** 4 kodlu numune (2000 W, 40 mm/sn-50 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



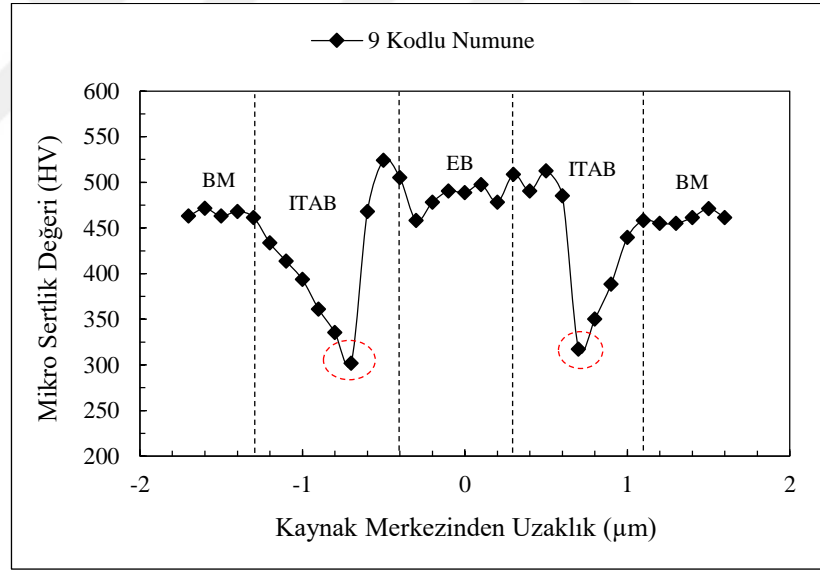
**Şekil 4.132.** 6 kodlu numune (2000 W, 120 mm/sn-16,7 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

Usibor fiber lazer kaynağı ile birleştirilen numuneler içerisinde en yüksek lazer gücü parametresi olan 2500 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn ) Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda birleştirilen numunelerden en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu (62,5 joule/mm) ve en düşük ısı girdisine sahip 9

kodlu (20,8 joule/mm) numunelere ait mikro sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.133 ve Şekil 4.134'te gösterilmiştir. 7 ve 9 kodlu numunelerin EB genişlikleri sırasıyla 1,1 mm ve 0,7 mm'dir. 7 kodlu numunenin EB'sinde ortalama mikro sertlik değerleri 514 HV<sub>0,2</sub> iken 9 kodlu numunenin EB'sinde ortalama mikro sertlik değeri 482 HV<sub>0,2</sub>'dir. 9 kodlu numunenin EB'sinde az da olsa oluşan ferrit fazı EB'si genel itibariyle martenzitten oluşan 7 kodlu numuneye göre daha düşük sertlik değerlerinin ölçülmesinin nedenidir. 7 kodlu numune ITAB (279,2 HV<sub>0,2</sub>) ve 9 kodlu numunede ITAB'ında (301,9 HV<sub>0,2</sub>) BM sertlik değerinden (460±5 HV<sub>0,2</sub>) çok daha düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. 9 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik düşüşü %34,37 iken 7 kodlu numune ITAB yumuşama bölgesinde BM'ye göre mikro sertlik %39,3 düşmüştür. 7 kodlu numunede ısı girdisinin 9 kodlu numuneden daha fazla olması BM içyapısındaki martenzitin daha fazla temperlenmesine tane irileşmesine sebep olmuştur. ITAB genişliği 7 kodlu numunede 3 mm iken 9 kodlu numunelerde 0,9 mm'dir. 7 kodlu numunenin EB'sinde ölçülen mikro sertlik değerleri KT-ITAB bölgesi sertliğinden daha yüksektir. Fakat 9 kodlu numunenin EB'sinde ölçülen sertlik değerleri KT-ITAB bölgesi sertliğinden daha düşüktür. 9 kodlu numunenin EB'sinde oluşan ferrit fazı, sertlik değerinin genel itibariyle martenzitten oluşan KT-ITAB ve İT-ITAB'dan düşük çıkmasına neden olmuştur (Şekil 4.120b). 7 kodlu numunede ise tam tersi EB sertlik değeri KT-ITAB ve İT-ITAB sertlik değerinden yüksektir. Isı girdisinin yüksek olmasıyla EB'de ince martenzit lamellerine sahip bir içyapı oluşmuştur (Şekil 4.123a). KT-ITAB ve İT-TAB'da martenzit lamellerinin kalınlaşması söz konusudur. (Şekil 4.123b,c).

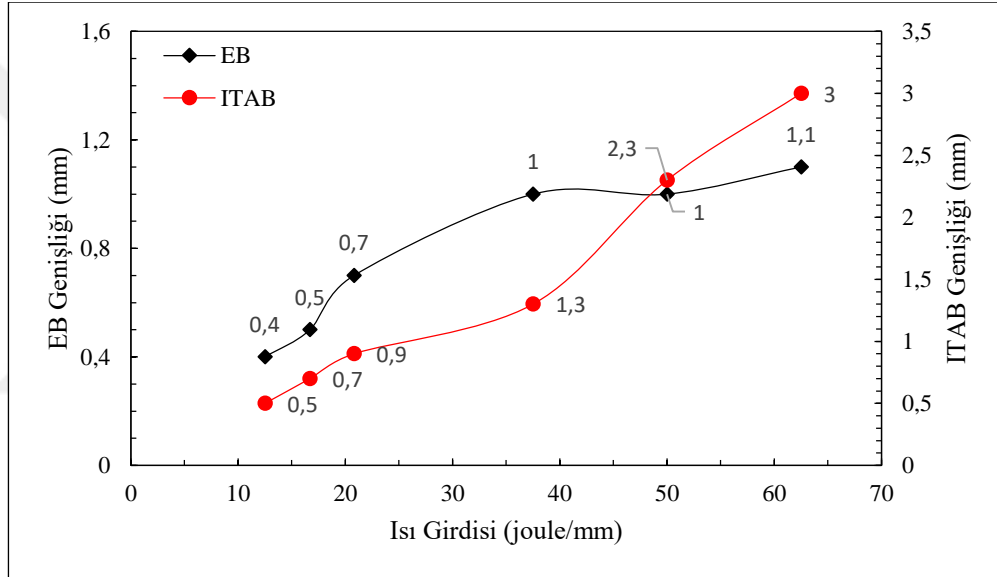


Şekil 4.133. 7 kodlu numune (2500 W, 40 mm/sn-62,5 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



Şekil 4.134. 9 kodlu numune (2500 W, 120 mm/sn-20,8 joule/mm) kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

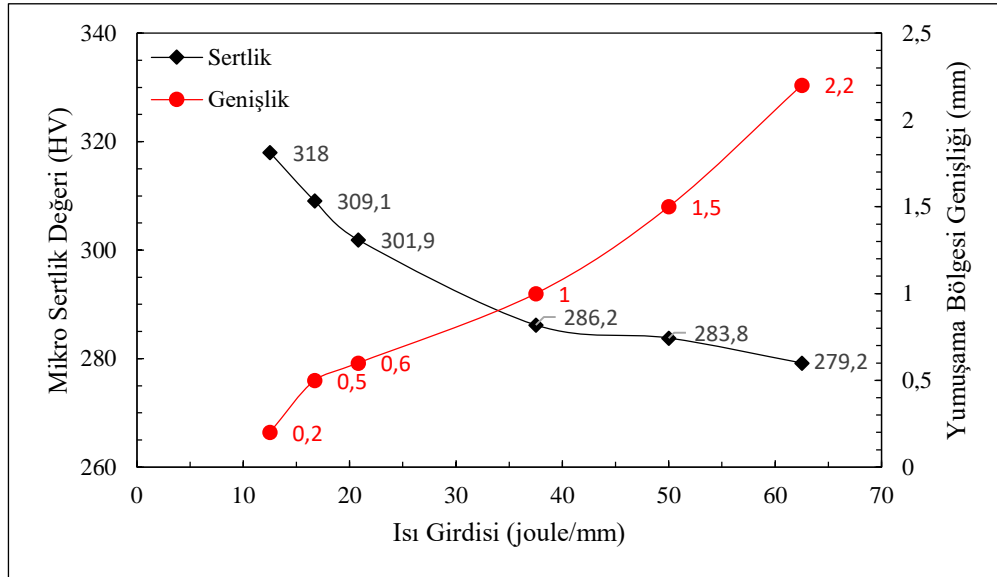
Fiber lazer kaynaklı Usibor1500 numunelerde mikro sertlik ölçümü sonucu ortaya çıkan EB ve ITAB genişliklerinin ısı girdisi ile değişimi Şekil 4.135'te gösterilmiştir. Isı girdisindeki artışla beraber EB genişliği ve ITAB genişliği artmıştır. En düşük EB genişliği ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (12,5 joule/mm) 0,4 mm iken en yüksek EB genişliği ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunede (62,5 joule/mm) 1,1 mm'dir. ITAB genişliği ise 3 kodlu numunede 0,5 mm iken 7 kodlu numunede 3 mm'dir. 1,1 mm kalınlığındaki bir sacın lazer kaynağı için elde edilen oldukça yüksek ITAB genişliğinden dolayı 7 kodlu numunede ısı girdisinin ideal ısı girdisinden fazla olduğu anlaşılmıştır.



**Şekil 4.135.** Isı girdisi ile EB genişliği ve ITAB genişliğinin değişimi

Şekil 4.136'da Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı numunelerde farklı ısı girdisiyle ITAB yumuşama bölgelerinde ölçülen en düşük mikro sertlik ve ITAB yumuşama bölgesi genişliği gösterilmektedir. Isı girdisindeki artış ile yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri azalmakta ve ITAB yumuşama bölgesinin genişliği artmaktadır. En düşük ITAB mikro sertlik değeri ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunede (62,5 joule/mm) 279,2 HV<sub>0,2</sub>'dir. 7 kodlu numunede BM'ye göre mikro sertlik değeri %39,3 düşüktür. Farklı parametrelerde birleştirilen numuneler arasında ölçülen en düşük ITAB yumuşama bölgesi sertlikleri içerisinde en

yüksek ITAB yumuşama bölgesi mikro sertlik değeri ise ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (12,5 joule/mm) 318 HV<sub>0,2</sub>'dir. 3 kodlu numunede BM'ye göre mikro sertlik değeri %30,87 düşüktür. Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 0,2 mm iken ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunede ITAB yumuşama bölgesi genişliği 2,2 mm'dir. Rossini ve ark. (2015) çalışmalarında araç gövde tasarım ve imalatında geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımını desteklemek için TWIP, TRIP, DP ve Usibor1500 çeliklerinin farklı türlerde lazer alın kaynağıyla birleştirilmesini incelemiştir. Usibor 1500 çeliğinde TWIP, TRIP ve DP çeliklerinden daha geniş bir ITAB oluşmuştur. Ayrıca, minimum sertlik ile ana metalin sertliği arasındaki fark Usibor1500 çeliği tarafında, TRIP ve DP tarafıyla karşılaştırıldığında çok daha yüksektir. Bu, kaynak işlemi sırasında Usibor1500 çeliğinin tamamen martenzitik mikro yapısının temperlenmesine atfedilmektedir. Fakat TRIP ve DP çeliklerinde temperleme, sadece orta derecede martenzit miktarlarına sahip olduklarından daha az önemli hal almıştır. Bu çalışmada da Usibor 1500 çeliğinde yumuşama bölgesinde yüksek sertlik düşüşü yaşanmasının nedeni BM iç yapısını oluşturan genel itibarıyla martenzitik iç yapının temperlenmesinden kaynaklanmaktadır.



**Şekil 4.136.** Isı girdisi ile ITAB yumuşama bölgesinde ölçülen en düşük mikro sertlik değeri ve ITAB yumuşama bölgesinin genişlik değeri değişimi

### 4.5.3 Çekme Testleri

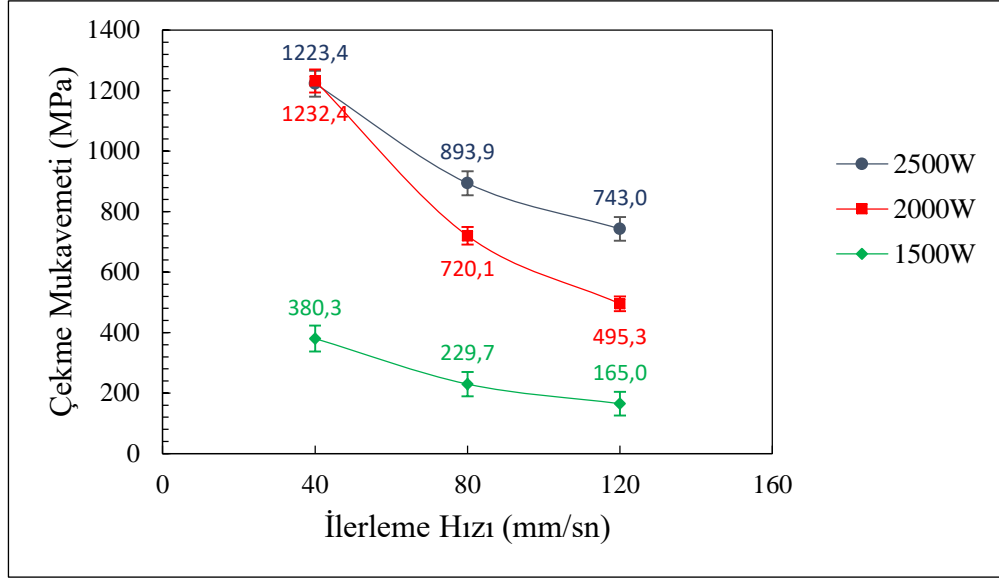
Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak birleştirilen numunelere ait çekme testi sonuçlarına ve çekme testi sonucu kırılan numunelerin kırılma bölgeleri Çizelge 4.14'te gösterilmiştir. Deneylerde üç farklı lazer gücü (1500 W, 2000 W ve 3000 W) ve üç farklı ilerleme hızı (40 mm/sn, 80 mm/sn ve 120 mm/sn) seçilmiştir. Kaynaklı numunelerdeki kırılmalar kaynak parametrelerine bağlı KM veya ITAB'da meydana gelmiştir. En yüksek çekme mukavemeti değerlerine ise 4 ve 7 kodlu numunelerde ulaşılmıştır.

**Çizelge 4.14.** Farklı parametrelerle üretilen Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonuçları

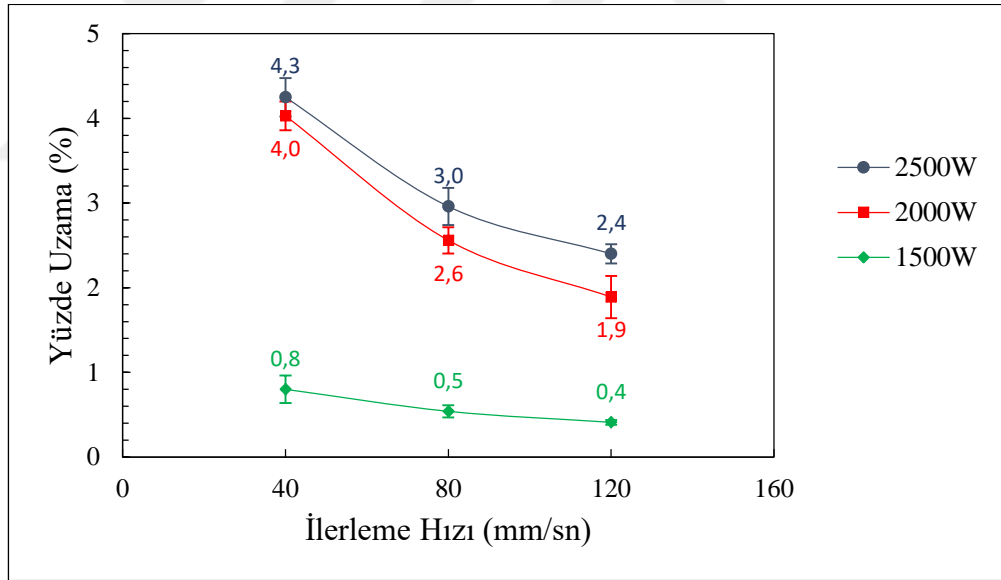
Numune Kodu	Isı Girdisi (Joule/mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Yüzde Uzama (%)	Standart Sapma	Kırılma Bölgesi
1	37,5	380,3	42,9	0,8	0,16	KM
2	18,75	229,7	40,1	0,5	0,07	KM
3	12,5	165	39,6	0,4	0,03	KM
4	50	1232,4	38,1	4	0,17	ITAB
5	25	720,1	29	2,6	0,16	KM
6	16,7	495,3	24,5	1,9	0,25	KM
7	62,5	1223,4	14,8	4,3	0,23	ITAB
8	31,3	893,9	31,1	3	0,22	KM
9	20,8	743	17	2,4	0,11	KM

1500 W, 2000 W ve 2500 W güç değerleri için ilerleme hızınının 40 mm/sn'den 120 mm/sn'ye arttırılmasıyla çekme mukavemeti ve yüzde uzamanın değişimi sırasıyla Şekil 4.137 ve Şekil 4.138'de gösterilmiştir. Üç farklı lazer gücünde de ilerleme hızı 40 mm/sn'den 120 mm/sn arttırıldığında çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri azalmıştır. 1500 W lazer gücünde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama 1 kodlu numunede (1500 W, 40 mm/sn) 380,3 MPa ve %0,8'dir. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama ise 3 kodlu numunede (1500 W, 120 mm/sn) 165 MPa ve %0,4'tür. 1500

W lazer gücünde ilerleme hızının 40 mm/sn'den 120 mm/sn'ye arttırılmasıyla çekme mukavemeti ve yüzde uzama sırasıyla %56,6 ve %50 azalmıştır. 1500 W lazer gücü ile kaynak edilen numunelerde genel itibariyle çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri çok düşük kalmıştır. 2000 W lazer gücünde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama 4 kodlu numunede (2000 W, 40 mm/sn) 1232,4 MPa ve %4'tür. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama 6 kodlu numunede (2000 W, 120 mm/sn) 495,3 MPa ve %1,9'dur. 2000 W lazer gücünde ilerleme hızının 40 mm/sn'den 120 mm/sn'ye arttırılmasıyla çekme mukavemeti ve yüzde uzama sırasıyla %59,8 ve %52,5 azalmıştır. 2000 W lazer gücü sonucu elde edilen çekme testi sonuçları 1500 W lazer gücü ile birleştirilen numunelerle kıyaslandığında çekme testi sonuçlarında önemli bir artış olduğu görülmektedir. 2500 W lazer gücünde en yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama 7 kodlu numunede (2500 W, 40 mm/sn) 1223,4 MPa ve %4,3'tür. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama 9 kodlu numunede (2500 W, 120 mm/sn) 743 MPa ve %2,4'tür. 2500 W lazer gücünde ilerleme hızının 40 mm/sn'den 120 mm/sn'ye arttırılmasıyla çekme mukavemeti ve yüzde uzama sırasıyla %39,3 ve %44,2 azalmıştır. Diğer numunelerle kıyaslandığında 2500 W lazer gücünde farklı ilerleme hızlarında yapılan kaynaklarda ilerleme hızındaki artışla beraber çekme mukavemetindeki ve yüzde uzamadaki düşüş daha azdır.



Şekil 4.137. 1500W, 2000W ve 2500W güç değerleri için çekme mukavemetinin ilerleme hızı ile değişimi



Şekil 4.138. 1500W, 2000W ve 2500W güç değerleri için yüzde uzamanın ilerleme hızı ile değişimi



Kaynak parametrelerinin çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için ANOVA uygulanmıştır (Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16). ANOVA sonucuna bakıldığında çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %65,38 ve %74,44 ile en çok etki eden parametre lazer gücü olmuştur. İlerleme hızının ise çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkisi sırasıyla %28,88 ve %20,21'dir. Çekme mukavemetinde ve yüzde uzamada kalan hata payları %5,75 ve %5,35'tir.

**Çizelge 4.15.** Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

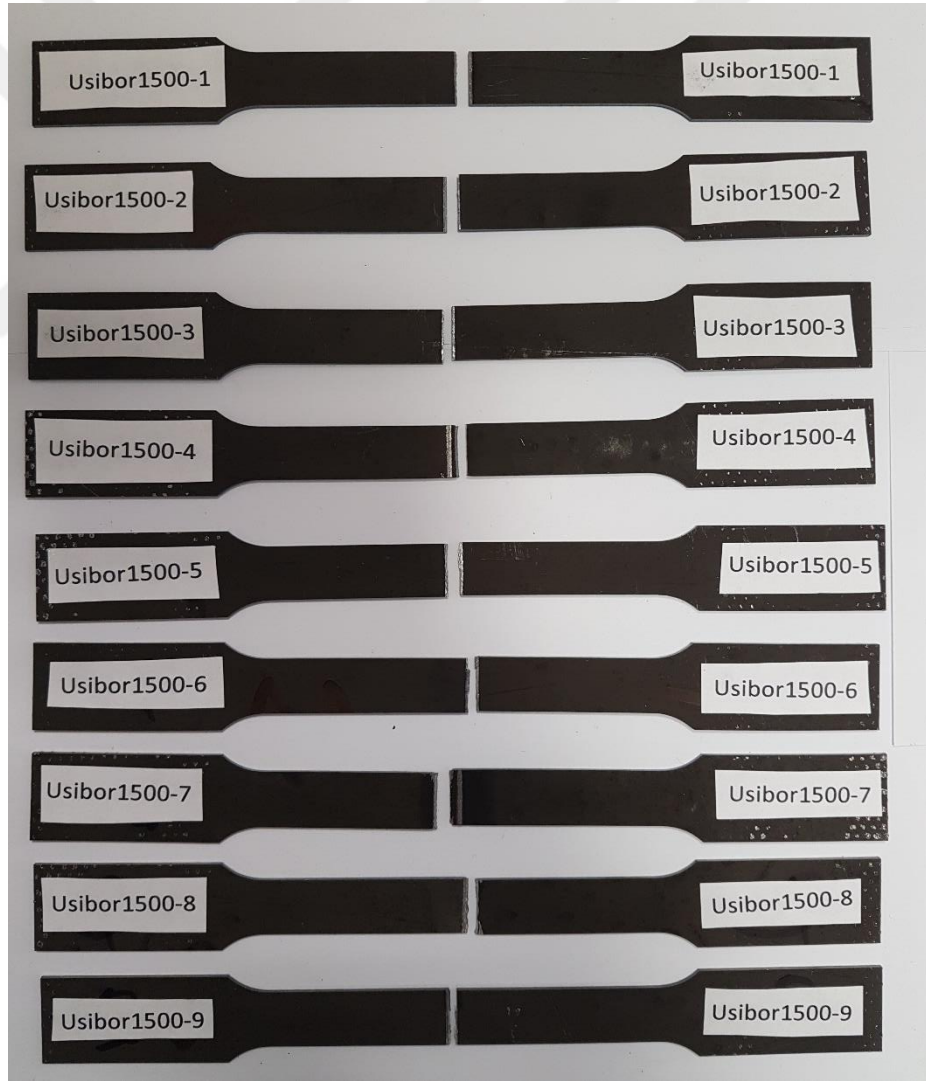
Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	2	812988	406494	22,75	0,007	65,38
İlerleme Hızı	2	359081	179540	10,05	0,028	28,88
Kalan Hata	4	71469	17867			5,75
Toplam	8					100

**Çizelge 4.16.** Kaynak parametrelerinin yüzde uzamaya olan etkilerini belirlemek için oluşturulan ANOVA tablosu

Parametre	DF	Adj SS	Adj MS	F	P	% Katkı
Lazer Gücü	2	12,4089	6,2044	27,85	0,004	74,44
İlerleme Hızı	2	3,3689	1,6844	7,56	0,044	20,21
Kalan Hata	4	0,8911	0,2228			5,35
Toplam	8					100

#### 4.5.4 Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

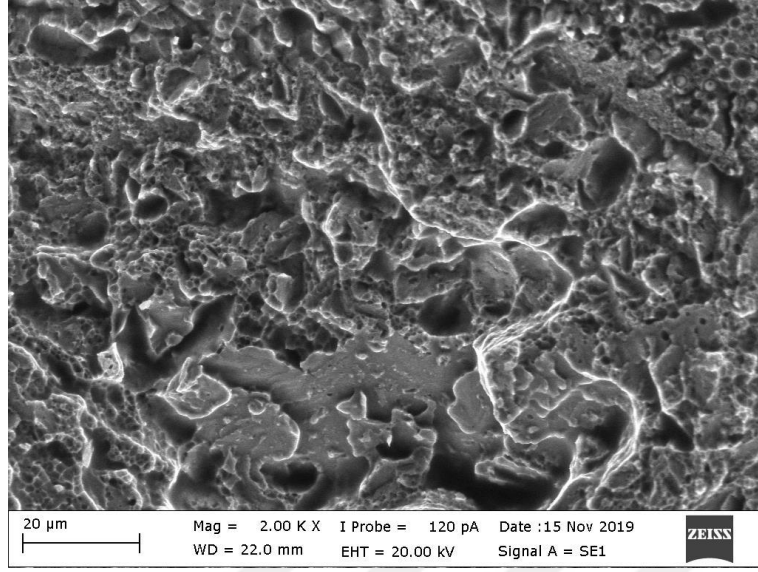
Usibor1500-Usibor1500 kombinasyonunda fiber lazer kaynaklı birleştirmelerde tüm numuneler çekme deneyi sonrası kaynak bölgesinden kırılmıştır (Şekil 4.139). 4 ve 7 kodlu numuneler ITAB'dan kırılırken diğery numuneler KM'den kırılmıştır. 4 kodlu (50 joule/mm) ve 7 kodlu (62,5 joule/mm) numunelerde yüksek ısı girdisiyle birlikte yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Diğery numunelerde lazer gücünün düşük ve kaynak hızının yüksek olmasından dolayı yüksek kaynak derinliklerine (penetrasyon derinliğine) ulaşamamıştır. Bu yüzden yüksek kalitede kaynaklar 4 ve 7 kodlu numuneler dışında yapılamamıştır.



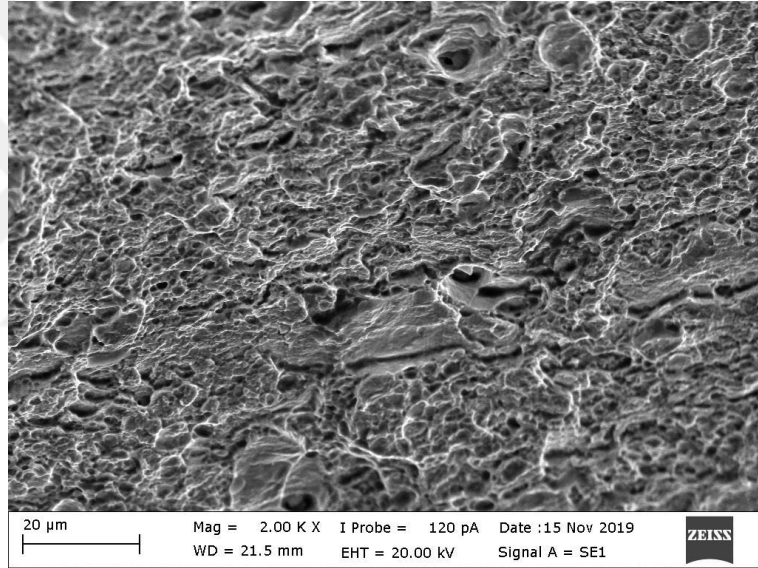
Şekil 4.139. Çekme testi sonucu kırılan kaynaklı numuneler

Şekil 4.140a ve Şekil 4.140b'de Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynağı ile birleştirilen en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (12,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu kırılma numunesine (62,5 joule/mm) ait SEM fotoğrafları gösterilmiştir. 3 kodlu numunede kırılma bölgesinde nispeten sünek kırılma belirtisi olan sığ çukurcuklu bölgelerin varlığı (az da olsa) söz konusu olsa da genel itibariyle gevrek kırılma yapısına sahip düz kısımlar göze çarpmaktadır (Şekil 4.140a). 7 kodlu numunede ise yine sığ fakat tüm yapıya yayılmış çukurcuklu ve yönlenmiş genel itibariyle nispeten sünek bir kırılma bölgesi ortaya çıkmıştır (Şekil 4.140b).





a)



b)

**Şekil 4.140.** Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı a) 3 kodlu numune (12,5 joule/mm) ve b) 7 kodlu numuneye (62,5 joule/mm) ait kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada DP800-DP800 Nd:YAG, DP800-DP800 fiber, DP1000-DP1000 fiber, DP1200-DP1200 fiber ve Usibor1500-Usibor1500 fiber kaynak işlemleri farklı lazer kaynak parametreleri kullanarak yapılmış ve her bir parametrenin mikro yapıya ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir.

- **DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numuneler**

Tez çalışmasının başında DP800-DP800 kaynak işlemleri farklı parametreler kullanılarak Nd:YAG lazer kaynak cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Fakat deneylerde kullanılan Nd:YAG lazer kaynak cihazının kapasitesi 1,2 mm kalınlığındaki DP800 sacları kaynak kökünden birleştirmeye yeterli olmamıştır.

En yüksek çekme mukavemeti (524,8 MPa) ve yüzde uzama değerine (%2,99) tüm numuneler içerisinde en yüksek ısı girdisine sahip 3 kodlu numunede (52,3 joule/mm) 2,8 ms darbe süresi, 7 kW darbe gücü, 8 Hz frekans, 1,1 mm ışın çapı ve 3 mm/sn kaynak hızı parametrelerinde ulaşılmıştır. Fakat yine de 524 MPa çekme mukavemeti ve %2,99 uzama değerleri otomotiv sanayinin gereksinimlerini karşılamaktan uzaktır. Ayrıca varyans analizi sonucu en etkili parametre olan darbe süresinin çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya olan etkisi sırasıyla %55,64 ve %38,48'dir. Frekansın çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkisi ise yok denecek kadar düşük seviyelerde kalmıştır.

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynak bölgesi EB, ÜK-ITAB, İK-ITAB, AK-ITAB ve BM bölgelerinden oluşmaktadır. EB ve ÜK-ITAB'da genel itibariyle martenzitten oluşan bir içyapı vardır. İK-ITAB ferrit ve martenzit, AK-ITAB ise temperlenmiş martenzit ve ferrit içyapısına sahiptir. BM içyapısı DP çeliklerinin karakteristik içyapısını oluşturan ferrit ve martenzittir.

EBSD analizlerinde ısı girdisi en yüksek ve en düşük numuneler seçilerek kaynak bölgesinden BM'ye geçiş bölgeleri taranmıştır. Isı girdisindeki artışla birlikte bu geçiş bölgelerinde yeniden kristallenme daha şiddetli gerçekleşmiştir. Isı girdisinin düşük olduğu 1 kodlu numunede 1,5°'nin altındaki GOS açısı dağılım oranı %16,7 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 3 kodlu numunede 1,5°'nin altındaki GOS açısı dağılım oranı %24,1'dir. Yeniden kristallenmenin de etkisiyle 3 kodlu numunenin geçiş bölgesindeki tane boyutu (1,34 µm) 1 kodlu numunenin geçiş bölgesindeki tane boyutundan (1,78 µm) düşüktür. EBSD faz haritalarından ısı girdisindeki artış ile içyapıdaki kalıntı ostenitin de %2,9'den %3,8'e yükseldiği görülmüştür.

Mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değerleri EB'de, en düşük sertlik değerleri ise İK-ITAB ile AK-ITAB sınırında ölçülmüştür. Artan ısı girdisi ile birlikte ITAB yumuşama bölgesindeki BM'ye göre sertlikteki düşüş yüzdesi artmıştır. Yumuşama bölgesinde oluşan temperlenmiş martenzit te BM'den daha düşük sertlik değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur. Isı girdisinin en yüksek olduğu 3 kodlu numunede (52,3 joule/mm) yumuşama bölgesinde mikro sertlik BM'ye göre %7,23 düşüktür.

Çekme deneyi sonrası tüm numuneler KM'den kırılmıştır. Kaynak kökünde birleşmenin gerçekleşmemesi kaynak kökünde gerilme yığılması oluşturarak kırılmanın KM'den gerçekleşmesine sebep olmuştur. Bu sebeple yüksek mukavemet değerlerine ulaşamamıştır. SEM kırılma yüzeyi incelemelerinde gevrek kırılmalar görülmüştür.

DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı numunelerde yüksek kaynak penetrasyon derinliğine ulaşamaması sonucu ışın çapı daha düşük değerlerde seçilerek kaynak işlemleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Fakat 1 mm ışın çapı değerinin altında kaynak yapıldığında yüksek yoğunluktaki lazer ışını kaynak parçasını kesmiştir. Daha yüksek penetrasyon derinliklerine ulaşabilmek için farklı teknolojik özelliklerde ve deneylerde kullanılan cihazın sahip olduğu 300 W güç değerinin çok daha yüksek güç kapasitesine sahip cihazlarda 1 mm ışın çapının altında denemeler yapılması tavsiye edilmektedir.

- **DP800-DP800 fiber lazer kaynaklı numuneler**

300 W ortalama lazer gücündeki Nd:YAG lazer kaynak cihazı ile başarılı kaynakların (kaynak kökünde birleşme sağlayabilecek) yapılamayacağını anlaşılmaya üzerine tez çalışmasının sonraki aşamalarına 3 kW lazer gücündeki fiber lazer kaynak cihazı kullanılarak devam edilmesine karar verilmiştir. 1,2 mm kalınlığındaki DP800 saclar fiber lazer kaynak cihazı ile farklı lazer güç ve ilerleme hızları parametreleri kullanılarak birleştirilmiştir.

Çekme deneyi sonucu BM mukavemet ve yüzde uzama değerleri yakalanmıştır. Özellikle 1 kodlu (55 joule/mm), 4 kodlu (45 joule/mm) ve 2 kodlu (36,7 joule/mm) numuneler gibi ısı girdisinin yüksek olduğu numunelerde yüksek çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Bu da ısı girdisinin diğer numunelerde düşük kaldığının bir işaretidir.

Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numune (55 joule/mm) yüksek çekme mukavemeti (852,8 MPa) ve yüzde uzamaya (%17,5) sahipken, ısı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numunede (17,5 joule/mm) çekme mukavemeti (305 MPa) ve yüzde uzama (%2,13) değerleri diğer numunelere göre düşüktür. En yüksek çekme özelliklerine sahip 1 kodlu numunenin kaynak parametreleri 2750 W lazer gücü ve 50 mm/sn ilerleme hızıdır. ANOVA sonucunda ise ilerleme hızının çekme mukavemetine (%69,72) ve yüzde uzamaya (%58,13) yüksek oranlarda etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

DP800-DP800 fiber lazer kaynak bölgesi EB, KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB, AK-ITAB ve BM bölgelerinden oluşmaktadır. EB, KT-ITAB ve İT-ITAB'da genel itibariyle martenzitten oluşan bir içyapı vardır. İK-ITAB ferrit ve martenzitten, AK-ITAB ise temperlenmiş martenzit ve ferritten oluşmaktadır. DP1000-DP1000, DP1200-DP1200 ve Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı birleştirmelerde de benzer kaynak bölgesi yapıları ve içyapıları ortaya çıkmıştır. Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı birleştirmede düşük ısı girdisinin olduğu numunelerde AlSi kaplamasındaki Al'nin EB'ye yüksek oranda karışması sonucu EB'de oluşan ferrit fazı farklılık olarak göze

çarpmaktadır. Ayrıca Usibor1500'de BM içyapısı DP çeliklerinden farklı olarak genel itibariyle martenzittir.

EBSD analizleri kapsamında en düşük ısı girdisine sahip 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 1 kodlu numune (55 joule/mm) analiz edilmiştir. Isı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numunede kaynak bölgesinden BM'ye geçiş keskin olsa da yoğun bir şekilde martenzit içyapısına sahip KT-ITAB ve İT-ITAB'ları kapsamaktadır. 1 kodlu numunede ise seçili alan genel itibariyle İK-ITAB bölgesini kapsamaktadır. Isı girdisinin düşük olduğu 9 kodlu numune martenzit bölgelerini yoğun olarak kapsadığından dolayı ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numuneye göre daha yüksek KAM ve GOS değerlerine sahiptir. 9 kodlu numunenin ortalama tane boyutu (1,22  $\mu\text{m}$ ) yeniden kristallenmenin de etkisiyle 1 kodlu numunenin ortalama tane boyutundan (1,52  $\mu\text{m}$ ) daha küçüktür. 1 kodlu numunede ısı girdisinin yüksek oluşundan kaynaklı tane irileşmesi görülmüştür. Kalıntı ostenit miktarları arasında ise seçili bölgelerde önemli bir fark yoktur. 1 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %3,7 iken 9 kodlu numunede %4,1'dir.

Makro yapı incelemelerinde ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (55 joule/mm) kaynak kökünde birleşme sağlanırken, ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (17,5 joule/mm) kaynak kökünde birleşmenin sağlanmadığı görülmüştür. Nd:YAG lazer kaynağına benzer şekilde oluşan farklı mikro yapı bölgeleri fiber lazer kaynağında daha net ortaya çıkmıştır. Özellikle ITAB yumuşama bölgesinde temperlenmiş martenzit oluşumu net bir şekilde SEM fotoğraflarında görülmüştür. Temperlenmiş martenzitin yüksek oluşu yumuşama bölgesindeki sertlik düşüşünde etkisini göstermiştir. DP800-DP800 Nd:YAG lazer kaynaklı birleştirmede yumuşama bölgesinde en yüksek sertlik düşüşü %7,23 iken DP800-D800 fiber lazer kaynaklı numuneler içerisinde en yüksek sertlik düşüşü %8,81'dir. Ayrıca ısı girdisinin en yüksek olduğu ve kaliteli birleştirmenin gerçekleştirildiği 1 kodlu numunede EB genişliği ve ITAB genişliği sırasıyla 1 mm ve 1,4 mm'dir. Bu değerler de 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın lazer kaynaklı birleştirmesi için makul sayılabilecek düzeydedir.



Isı girdisinin yüksek olduğu 1, 2 ve 4 kodlu numuneler (36,7 joule/mm-55 joule/mm) çekme deneyi sonucunda BM'den kırılırken diğer numuneler kaynak bölgesinden kırılmıştır. Isı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede (55 joule/mm) sünek kırılma yüzeyi görülürken, ısı girdisinin en düşük olduğu 9 kodlu numune (17,5 joule/mm) gevrek bir şekilde kırılmıştır. Genel itibariyle fiber lazer kaynağı ile DP800 saclar Nd:YAG kaynağına göre daha kaliteli ve çok daha hızlı bir şekilde birleştirilmiştir. 1, 2 ve 4 kodlu numunelerde kaynak kökünde birleşmenin sağlanıp kaynaklı numunelerin BM'den kırılması ve kaynak genişliklerinin 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın alın kaynağı için makul seviyelerde olması kaliteli kaynakların yapıldığının ispatıdır.

- **DP1000-DP1000 fiber lazer kaynaklı numuneler**

2,5 mm kalınlığında DP1000 sacları kaliteli bir şekilde kaynak kökünden birleştirebilmek için 1,2 mm kalınlığındaki DP800 saclarına göre daha yüksek ısı girdisi gerekeceği düşünülerek parametre seçiminde bu hususa dikkat edilmiştir. Nitekim kaliteli birleştirmelere ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu (88 joule/mm) ve 4 kodlu (120 joule/mm) numunelerde ulaşılabilmektedir.

En yüksek çekme mukavemeti (1036,8 MPa) ve yüzde uzama (%12,7) değerine 1 kodlu numunede (88 joule/mm) ve en düşük çekme mukavemeti (362,5 MPa) ve yüzde uzama (%3,9) değerine ise 3 kodlu numunede (29,3 joule/mm) ulaşılmıştır. 1 kodlu numunenin lazer gücü 2200 W ve ilerleme hızı 25 mm/sn iken 3 kodlu numunenin lazer gücü 2200 W ve ilerleme hızı 75 mm/sn'dir. Ayrıca ANOVA'da ilerleme hızının çekme mukavemeti ve yüzde uzamaya sırasıyla %98,17 ve %99,38 katkısı olduğu belirlenmiştir. Deneylerde seçilen kaynak parametre aralığında lazer gücünün etkisi yok denecek kadar azdır. Bunda lazer gücünün sadece iki farklı seviye, ilerleme hızının ise üç farklı seviyede değişmesinin etkili olduğunu söylemek gerekir.

Çekme deneyi sonrası 1 ve 4 kodlu numunelerde kırılma BM'den 2, 3 ve 6 kodlu numunelerde kırılma KM'den ve 5 kodlu numunede kırılma ITAB'dan gerçekleşmiştir. Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunenin (29,3 joule/mm) kırılma yüzeyinde

gevrek kırılma gözlenirken 4 kodlu (120 joule/mm) ısı girdisinin en yüksek olduğu numunede sünek kırılma gözlenmiştir.

ITAB yumuşama bölgesinde yüzde sertlik düşüşü ısı girdisiyle artmaktadır. Yumuşama bölgesinde BM'ye göre en yüksek sertlik düşüşü 4 kodlu numunede %9,9'dur. DP1000 çeliğinde martenzit içeriğinin DP800 çeliğine göre yüksek oluşu yumuşama bölgesinde DP800 çeliğine göre sertlik düşüşünün daha yüksek olmasına neden olmuştur. Ayrıca en yüksek ısı girdisine sahip ve kaliteli bir birleştirmenin yapıldığı 4 kodlu numunede EB genişliği 1,2 mm ve ITAB genişliği 2,2 mm'dir.

EBSA analizinde kaynak bölgesinden BM'ye geçiş bölgeleri tüm numuneler içerisinde en düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu numune (29,3 joule/mm) ve en yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu numune (120 joule/mm) için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özellikle ısı girdisinin daha düşük olduğu 3 kodlu numunenin GOS değeri (3,21) ısı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu numunenin GOS değerinden (2,33) daha yüksek çıkmıştır. 4 kodlu numunede seçili alan İT-ITAB'da yoğun bir şekilde kaldığından dolayı yeniden kristallenme etkili olmuş ve 3 kodlu numuneye göre daha düşük GOS değeri elde edilmiştir. Yeniden kristallenmenin etkisiyle 4 kodlu numunede seçili bölgede ortalama tane boyutu 0,79 µm iken 3 kodlu numunede ortalama tane boyutu 1,20 µm'dir.

- **DP1200-DP1200 fiber lazer kaynaklı numuneler**

1,2 mm kalınlığındaki DP1200 saclarının kaynağında genel itibariyle kaliteli kaynaklı birleştirmeler elde edilmiştir. Isı girdisinin olduğu ve parametrelerin yetersiz kaldığı 5 kodlu (21 joule/mm) ve 6 kodlu (25 joule/mm) numuneler haricinde kalan tüm numunelerde kaynak kökünde birleşme sağlanabilmiştir.

Çekme deneyi sonucunda en yüksek mukavemet değerine 8 kodlu numunede (40 joule/mm) 1266,5 MPa ve en yüksek uzama değerine 9 kodlu numunede (45 joule/mm) %6,06 ile ulaşılmıştır. En düşük çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri ise 25 joule/mm ısı girdisine sahip 6 kodlu numunede 818,1 MPa ve %3,41'dir. Kaynak parametrelerinin çekme özelliklerine olan etkilerini belirlemek üzere yapılan ANOVA'da

ise çekme mukavemetine %74,1 ve yüzde uzamaya %74,9 ile en çok katkı yapan parametre lazer gücü olmuştur.

Makro yapı görüntülerinde ısı girdisinin en yüksek olduğu 1 kodlu numunede fiber lazer kaynağı için oldukça geniş sayılabilecek bir kaynak genişliği ölçülmüştür. 1 kodlu numunedeki 105 joule/mm ısı girdisinin çok yüksek olduğu ve kaynak parametreleri içinde ikinci büyük ısı girdisi olan 2 kodlu numuneye ait 52,5 joule/mm'nin üzerindeki ısı girdileri 1,2 mm kalınlığındaki DP1200 sacın fiber alın kaynağı için tavsiye edilmemektedir. Isı girdisinin yüksek olması yumuşama bölgesi olan İK-ITAB ve AK-ITAB'ın genişliklerini arttırmakta ve parça kalınlığına göre çok geniş bir kaynak bölgesi oluşmasına (yaklaşık olarak 8 mm ) neden olmaktadır.

EBSA analizlerinde ısı girdisinin aşırı yüksek olduğu 1 kodlu numune (105 joule/mm) ve en düşük olduğu 5 kodlu numunenin (21 joule/mm) kaynak bölgesinden BM'ye geçiş bölgeleri seçilerek incelenmiştir. Burada dikkat çekici husus aşırı ısı girdisine sahip 1 kodlu numunede İK-TAB'daki tane irileşmesidir. Isı girdisinin düşük olduğu 5 kodlu numunede seçili bölgede ortalama tane boyutu (1,09 µm) ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numuneye ait 2,49 µm ortalama tane boyutundan oldukça düşüktür. Ayrıca 1 kodlu numunede iri taneli bölgenin yüksek yüzdesel orana da sahip olduğu belirlenmiştir. EBSA faz analizinde ısı girdisindeki artışla birlikte 1 kodlu numunede 5 kodlu numuneye göre kalıntı ostenit miktarındaki düşüş te dikkat çekicidir. Isı girdisinin düşük olduğu 5 kodlu numunede seçili bölgede kalıntı ostenit miktarı %2,1 iken ısı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede kalıntı ostenit miktarı %1,4'tür.

Mikro sertlik ölçümlerinde DP1200 çeliğinin karbon ve içyapısındaki martenzit oranının fazla olmasından dolayı DP800 ve DP1000 çelikleriyle kıyaslandığında yumuşama bölgesinde yüksek mikro sertlik düşüşleri ölçülmüştür. Bunun yanında yumuşama bölgesi genişliği de DP800 ve DP1000 numunelerine göre oldukça fazladır. Isı girdisinin yüksek olduğu 1 kodlu numunede (105 joule/mm) yumuşama bölgesinde BM'ye göre %29,21'e varan mikro sertlik düşüşü görülmüştür. Ayrıca genel itibariyle en yüksek mikro sertlik ölçümlerine İT-ITAB bölgesinde ulaşılmıştır. Mikro sertlik ölçümlerinde ısı girdisinin en

yüksek olduğu 1 kodlu numunede (105 joule/mm) 1,9 mm'lik EB genişliği ve 3,5 mm'lik ITAB genişliği 1,2 mm kalınlığındaki bir sacın lazer kaynağı için çok yüksek değerlerdir.

Çekme deneyi sonrası tüm numuneler kaynak bölgesinden kırılmıştır. Isı girdisinin düşük olduğu 4 kodlu (26,25 joule/mm), 5 kodlu (21 joule/mm) ve 6 kodlu (25 joule/mm) numuneler KM'den kırılırken diğer numuneler ITAB'dan kırılmıştır. Kırılma yüzeyi incelemelerinde de ağırlıklı olarak gevrek türde kırılmalar görülmüştür.

- **Usibor1500-Usibor1500 fiber lazer kaynaklı numuneler**

1,1 mm kalınlığındaki ısıl işlem uygulanmış Usibor1500 sacların kaynağında DP1200 sacların kaynağından edinilen tecrübeler doğrultusunda 62,5 joule/mm ısı girdisini geçmeyecek şekilde farklı lazer gücü ve ilerleme hızlarında kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir.

En yüksek ısı girdisine sahip 4 kodlu (50 joule/mm) ve 7 kodlu (62,5 joule/mm) numunelerde en yüksek çekme özelliklerine sahip kaynaklı birleştirmeler elde edilmiştir. En yüksek çekme özelliklerine 7 kodlu numunede 1223,4 MPa çekme mukavemeti ve %4,3 uzama değeriyle ulaşılırken, en düşük çekme özellikleri ısı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (12,5 joule/mm) 165 MPa çekme mukavemeti ve %0,4 uzamadır. ANOVA'da en etkili parametre lazer gücü olmuştur. Lazer gücünün çekme mukavemetine ve yüzde uzamaya etkileri sırasıyla %65,38 ve %74,44'tür.

4 ve 7 kodlu numunelerde yüksek kalitede birleştirme ve kaynak kökünde birleşme sağlanabilmiştir. Bu sebeple 50 joule/mm ısı girdisinin üzeri 1,1 mm kalınlığındaki ısıl işlem görmüş Usibor1500 sacların kaynağında uygun olarak görülmektedir. Ayrıca ısı girdisinin düşük olduğu (12,5 joule/mm) 3 kodlu numunede Al-Si kaplama tabakasının yoğun bir şekilde EB'ye karıştığı ve bu bölgede ferrit fazının oluşmasına yol açtığı tespit edilmiştir. EB'de ferrit fazının yanında dendritik martenzit oluşumu da vardır. Kaplama tabakasındaki Al'nin yüksek oranda EB'ye karışması Usibor1500'ün yapısında bulunabilecek ferriti stabilize ederek ostenit dönüşümünü engellemiştir. EB'de bulunan

ferrit fazı 3 kodlu numunede EB mikro sertlik değerinin de düşük kalmasına sebep olmuştur.

EBSA analizleri için düşük ısı girdisine sahip 3 kodlu (12,5 joule/mm) ve yüksek ısı girdisine sahip 7 kodlu (62,5 joule/mm) numuneler seçilmiştir. İK-ITAB civarı seçili bölgeler analiz edilmiştir. Usibor 1500 EBSA analizlerinde ısı girdisiyle birlikte tane boyutu artmıştır. Isı girdisinin düşük olduğu 3 kodlu numunede seçili bölgede ortalama tane boyutu 2,14 µm iken ısı girdisinin yüksek olduğu 7 kodlu numunede ortalama tane boyutu 2,40 µm'dir. EBSA haritalarında ferritin yapı içerisine dengeli bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Ayrıca GOS açısı dağılımlarında her iki numunede de 1,5°-3° arasında %70 civarında bir yoğunluk vardır. 1,5°-3° arasında yığılma içyapıdaki yüksek orandaki beynitin de göstergesidir.

Usibor1500 çeliği genel itibariyle martenzitik bir içyapıya sahip olduğundan dolayı ITAB yumuşama bölgesinde farklı martenzit oranlarına sahip tüm DP çeliklerinin üzerinde sertlik düşüşleri görülmüştür. Isı girdisinin en düşük olduğu 3 kodlu numunede (12,5 joule/mm) dahi yumuşama bölgesinde BM'ye göre %30,87 sertlik düşüşü görülürken, ısı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunede (62,5 joule/mm) %39,3 sertlik düşüşü görülmüştür. Ayrıca mikro sertlik ölçümlerinde geniş yumuşama bölgeleri tespit edilmiştir. Isı girdisinin en yüksek olduğu 7 kodlu numunenin yumuşama bölgesi genişliği 2,2 mm gibi yüksek bir değerdir.

Çekme testlerinde tüm numuneler kaynak bölgesinden kırılmıştır. Isı girdisinin yüksek olduğu 4 kodlu (50 joule/mm) ve 6 kodlu (62,5 joule/mm) numunelerde kırılmalar ITAB'da gerçekleşirken diğer numuneler KM'den kırılmıştır. SEM kırılma yüzeyi incelemelerinde gevrek kırılmalar tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Afonso, V., Roberto, J., Rossi, W. De 2010.** Journal of Materials Processing Technology Pulsed Nd : YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. *Journal of Materials Processing Tech.*, 210(14):, 1838–1843. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.015>
- Aktarer, S. M. 2019.** Sürtünme Karıştırma İşleminin DP600 Çeliğine Uygulanması: İç Yapı ve Şekillendirilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alves, P. H. O. M., Lima, M. S. F., Raabe, D., Sandim, H. R. Z. 2018.** Laser beam welding of dual-phase DP1000 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 252(April 2017):, 498–510. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.008>
- Anonim 2017.** 2017 yılında ABD’de ekonomik sektöre göre toplam sera gazı emisyonları. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>- Erişim Tarihi:09.12.2019.
- Anonim 2019a.** Çift fazlı çeliklerin benzersiz özellikleri. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/the-unique-characteristics-of-dual-phase-steels> - Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- Anonim 2019b.** Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik türlerinin çekme mukavemeti birim şekil değiştirme grafiği. <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/> - Erişim Tarihi:09.12.2019.
- Anonim 2019c.** Lazer Kaynağı. <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/> - Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- Anonim 2019d.** Sıcak şekillendirme çelikleri. [https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor\\_ductibor](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor) - Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- Anonim 2019e.** Yaşam döngüsü emisyonlarının etkisi: AHSS ile alüminyum arasındaki hafifletme farkı. <https://newsroom.posco.com/en/ahss-aluminum-lca/> - Erişim Tarihi: 05.12.2019.
- Aras, S., Ertan, R., Özgül, H. G. 2018.** Investigation of mechanical properties of high strength steel welded by resistance spot welding. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(1):, 63–68. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.88972>
- Arias, R., Prada, Á., Vaamonde, E., Vandewynckèle, A., Gutierrez, D., Lara, A., García, M. 2018.** Laser welding applied to advanced high strength steels for automotive applications. *Journal of Laser Applications* , 371:, 371–379. <https://doi.org/10.2351/1.5062052>
- Assunção, E., Quintino, L., Miranda, R. 2010.** Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1–4):, 123–131. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2385-0>
- ASTM-E8/E8M 2009.** Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International.
- Aydın, H. 2015.** The mechanical properties of dissimilar resistance spot-welded DP600-DP1000 steel joints for automotive applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(5):, 599–610. <https://doi.org/10.1177/0954407014547749>
- Aziz, N., Aqida, S. N. 2013.** Optimization of quenching process in hot press forming of 22MnB5 steel for high strength properties for publication in. IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering, 50(1):. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/50/1/012064>

**Baghjari, S. H., Akbari Mousavi, S. A. A. 2013.** Effects of pulsed Nd:YAG laser welding parameters and subsequent post-weld heat treatment on microstructure and hardness of AISI 420 stainless steel. *Materials & Design*, 43:, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.027>

**Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Baltazar-Hernandez, V. H., Zhou, Y. N. 2016.** Microstructures and failure analyses of DP980 laser welded blanks in formability context. *Materials Science and Engineering A*, 652:, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.091>

**Barbier, D., Germain, L., Hazotte, A., Gouné, M., Chbihi, A. 2015.** Microstructures resulting from the interaction between ferrite recrystallization and austenite formation in dual-phase steels. *Journal of Materials Science*, 50(1):, 374–381. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8596-2>

**Biro, E., Gerlich, A. P., Nayak, S. S., Zhou, Y., Saha, D. C., Westerbaan, D. 2014.** Microstructure-properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels. *Materials Science and Engineering: A*, 607:, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.034>

**Black, S., Jobling, L. 2014.** Physical principles of LASER. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 15(11):, 530–532. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2014.08.003>

**Boher, C., Roux, S. Le, Penazzi, L., Dessain, C. 2012.** Experimental investigation of the tribological behavior and wear mechanisms of tool steel grades in hot stamping of a high-strength boron steel. *Wear*, 294–295:, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.001>

**Bozzolo, N., Jacomet, S., Logé, R. E. 2012.** Fast in-situ annealing stage coupled with EBSD: A suitable tool to observe quick recrystallization mechanisms. *Materials Characterization*, 70:, 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.04.020>

**Chabok, A., van der Aa, E., De Hosson, J. T. M., Pei, Y. T. 2017.** Mechanical behavior and failure mechanism of resistance spot welded DP1000 dual phase steel. *Materials and Design*, 124:, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.070>

**Chen, H., Pinkerton, A. J., Li, L., Liu, Z., Mistry, A. T. 2011.** Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications. *Materials and Design*, 32(2):, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.034>

**Chen, X., Niu, C., Lian, C., Lin, J. 2017.** The Evaluation of Formability of the 3rd Generation Advanced High Strength Steels QP980 based on Digital Image Correlation Method. *Procedia Engineering*, 207:, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1020>

**Choi, H. S., Kim, B. M., Kim, D. H., Ko, D. C. 2014.** Application of mechanical trimming to hot stamped 22MnB5 parts for energy saving. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(6):, 1087–1093. <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0441-7>

**Cui, Q. L., Parkes, D., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Liu, D., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. 2016.** Effect of coating on fiber laser welded joints of DP980 steels. *Materials and Design*, 90:, 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.098>

**Di, H. S., Sun, Q., Nie, X. K., Wang, X. N., Chen, X. M. 2017.** Microstructure and properties of laser welded joints of dual phase and press-hardened steels. *Procedia Engineering*, 207:, 1665–1670. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.919>

**Di, H., Sun, Q., Wang, X., Li, J. 2017.** Microstructure and properties in

- dissimilar/similar weld joints between DP780 and DP980 steels processed by fiber laser welding. *Journal of Materials Science and Technology*, 33(12):, 1561–1571. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.001>
- Dong, D., Liu, Y., Wang, L., Yang, Y., Jiang, D., Yang, R., Zhang, W. 2016.** Microstructure and deformation behavior of laserwelded dissimilar dual phase steel joints. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(2):, 75–82. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000067>
- Dong, Danyang, Liu, Y., Yang, Y., Li, J., Ma, M., Jiang, T. 2014.** Materials Science & Engineering A Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding. *Materials Science & Engineering A*, 594:, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.047>
- Duan, L., Xiao, N. cong, Hu, Z., Li, G., Cheng, A. 2017.** An efficient lightweight design strategy for body-in-white based on implicit parameterization technique. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(5):, 1927–1943. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1621-0>
- Evin, E., Tom, M. 2017.** The Influence of Laser Welding on the Mechanical Properties of Dual Phase and Trip Steels. *Metals* , 1–16. <https://doi.org/10.3390/met7070239>
- Farabi, N., Chen, D. L., Zhou, Y. 2011.** Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(3):, 982–989. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.08.158>
- Farrokhi, F., Siltanen, J., Salminen, A. 2019.** Fiber Laser Welding of Direct- Quenched Ultrahigh Strength Steels : Evaluation of Hardness , Tensile Strength , and Toughness Properties at Subzero Temperatures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(December 2015):, 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4030177>
- Fernandes, F. A. O., Oliveira, D. F., Pereira, A. B. 2017.** Optimal parameters for laser welding of advanced high-strength steels used in the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 13:, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.052>
- Frómeta, D., Lara, A., Molas, S., Casellas, D., Rehrl, J., Suppan, C., Larour, P., Calvo, J. 2018.** On the correlation between fracture toughness and crash resistance of advanced high strength steels. *Engineering Fracture Mechanics*, (September):, 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.005>
- Geiger, M., Merklein, M., Hoff, C. 2005.** Basic investigations on the hot stamping steel 22MnB5. *Advanced Materials Research*, 6–8:, 795–802. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.795>
- Gourgues, A. F., Flower, H. M., Lindley, T. C. 2000.** Electron backscattering diffraction study of acicular ferrite, bainite, and martensite steel microstructures. *Materials Science and Technology*, 16(1):, 26–40. <https://doi.org/10.1179/026708300773002636>
- Güler, H. 2013.** Investigation of usibor 1500 formability in a hot forming operation. *Medziagotyra*, 19(2):, 144–146. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.19.2.1484>
- Güneş, C. 2012.** Benzinli enjektörlerin lazer kaynağı ve lazer kaynak parametreleri. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi*.
- Guo, W., Wan, Z., Peng, P., Jia, Q., Zou, G., Peng, Y. 2018.** Microstructure and mechanical properties of fiber laser welded QP980 steel. *Journal of Materials Processing Tech.*, 256(37):, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.015>
- Hekmatjou, H., Naffakh-Moosavy, H. 2018.** Hot cracking in pulsed Nd:YAG laser welding of AA5456. *Optics and Laser Technology*, 103:, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.020>



- Huan, P., Wang, X., Yang, L., Zheng, Z., Hu, Z., Zhang, M., Chen, C. 2019.** Effect of Martensite Content on Failure Behavior of Laser Welded Dual-Phase Steel Joints During Deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3):, 1780–1788. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03941-3>
- Iordachescu, D., Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M., Ocaña, J. L. 2011.** Recent achievements and trends in laser welding of thin plates. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 13(8):, 981–985.
- Iordachescu, Danut, Blasco, M., Lopez, R., Cuesta, A., Iordachescu, M., Ocaña, J. L. 2011.** Development of Robotized Laser Welding Applications for Joining Thin Sheets. *(Optirob)*:, 26–28.
- Jia, Q., Guo, W., Li, W., Zhu, Y., Peng, P., Zou, G. 2016.** Microstructure and tensile behavior of fiber laser-welded blanks of DP600 and DP980 steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 236:, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.011>
- Jia, Q., Guo, W., Peng, P., Li, M., Zhu, Y., Zou, G. 2016.** Microstructure- and Strain Rate-Dependent Tensile Behavior of Fiber Laser-Welded DP980 Steel Joint. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(2):, 668–676. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1864-8>
- Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., Zhou, Y. N. 2018.** Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar joints between QP and boron alloyed martensitic steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 259(April):, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.020>
- Jong, Y.-S., Lee, Y.-K., Kim, D.-C., Kang, M.-J., Hwang, I.-S., Lee, W.-B. 2011.** Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel Containing Boron. *Materials Transactions*, 52(6):, 1330–1333. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2011005>
- Khosravani, A., Cecen, A., Kalidindi, S. R. 2017.** Development of high throughput assays for establishing process-structure-property linkages in multiphase polycrystalline metals: Application to dual-phase steels. *Acta Materialia*, 123(January 2018):, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.10.033>
- Kim, C., Kang, M. J., Park, Y. D. 2011.** Laser welding of Al-Si coated hot stamping steel. *Procedia Engineering*, 10:, 2226–2231. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.368>
- Koleva, E., Academy, B., Mihaylov, G., Bulgarian, M., Mladenov, G. M. 2015.** Experience on electron beam welding. *Practical Aspects and Application and Electron Beam Irradiation*
- Li, J., Nayak, S. S., Biro, E., Panda, S. K., Goodwin, F., Zhou, Y. 2013.** Effects of weld line position and geometry on the formability of laser welded high strength low alloy and dual-phase steel blanks. *Materials and Design*, 52:, 757–766. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.021>
- Liang, X., Yuan, X., Wang, H., Li, X., Li, C., Pan, X. 2016.** Microstructure, mechanical properties and failure mechanisms of resistance spot welding joints between ultra high strength steel 22MnB5 and galvanized steel HSLA350. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(12):, 1659–1664. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0192-8>
- Lin, H. P., Chen, Y. C., Chen, D., Kuo, J. C. 2014.** Effect of cold deformation on the recrystallization behavior of FePd alloy at the ordering temperature using electron backscatter diffraction. *Materials Characterization*, 94:, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.05.018>

- Liu, Y., Dong, D., Wang, L., Chu, X., Wang, P., Jin, M. 2015.** Strain rate dependent deformation and failure behavior of laser welded DP780 steel joint under dynamic tensile loading. *Materials Science and Engineering A*, 627:, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.103>
- Mandal, S., Mishra, S. K., Kumar, A., Samajdar, I., Sivaprasad, P. V., Jayakumar, T., Raj, B., Mandal, S., Mishra, S. K., Kumar, A., Samajdar, I., Sivaprasad, P. V 2008.** Evolution and characterization of dynamically recrystallized microstructure in a titanium- modified austenitic stainless steel using ultrasonic and EBSD techniques. *Philosophical Magazine*, 6435(May): <https://doi.org/10.1080/14786430801989799>
- Meng, Y., Hrubciak, R., Rod, E., Boehler, R., Shen, G. 2015.** New developments in laser-heated diamond anvil cell with in situ synchrotron x-ray diffraction at High Pressure Collaborative Access Team. *Review of Scientific Instruments*, 86(7):. <https://doi.org/10.1063/1.4926895>
- Nayak, S. S., Biro, E., Zhou, Y. 2015.** 5 - Laser welding of advanced high-strength steels (AHSS), *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00005-9>
- Önal, A. S., Kaya, N. 2014.** Effect and optimization of resistance spot welding parameters on the strength of welded hot-stamped parts. *Materialpruefung/Materials Testing*, 56(6):, 466–471. <https://doi.org/10.3139/120.110585>
- P. Svec, A. Schrek, T. C. 2016.** Fiber laser welding of Dual-Phase and Bake-Hardened Steels. *Strength of Materials*, 48(4):, 481–486. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9789-5>
- Parkes, D., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. 2014.** Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures. *Journal of Materials&Design*, 56:, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.087>
- Parkes, D., Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. 2013.** Microstructure and fatigue properties of fiber laser welded dissimilar joints between high strength low alloy and dual-phase steels. *Materials and Design*, 51:, 665–675. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.076>
- Petrov, R., Kestens, L., Wasilkowska, A., Houbaert, Y. 2007.** Microstructure and texture of a lightly deformed TRIP-assisted steel characterized by means of the EBSD technique. *Materials Science and Engineering A*, 447(1–2):, 285–297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.023>
- Radwanski, K. 2015.** Application of FEG-SEM and EBSD Methods for the Analysis of the Restoration Processes Occurring During Continuous Annealing of Dual-Phase Steel Strips. *Steel Research International* , 86(11):, 1379–1390. <https://doi.org/10.1002/srin.201400361>
- Raugei, M., Morrey, D., Hutchinson, A., Winfield, P. 2015.** A coherent life cycle assessment of a range of lightweighting strategies for compact vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 108:, 1168–1176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.100>
- Razmpoosh, M. H., Macwan, A., Biro, E., Zhou, Y. 2018.** Surface & Coatings Technology Effect of coating weight on fiber laser welding of Galvanneal-coated 22MnB5 press hardening steel. *Surface & Coatings Technology*, 337(October 2017):, 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.053>
- Razmpoosh, M. H., Macwan, A., Biro, E., Zhou, Y. 2019.** Effect of galvanneal-coating evolution during press-hardening on laser welding of 22MnB5 steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 0(0):, 1–7. <https://doi.org/10.1080/13621718>

2019.1639271

**Rossini, M., Spena, P. R., Cortese, L., Matteis, P., Firrao, D. 2015.** Materials Science & Engineering A Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry. *Materials Science & Engineering A*, 628:, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.01.037>

**Saha, D. C., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Biro, E., Gerlich, A. P., Zhou, Y. 2014.** Microstructure-properties correlation in fiber laser welding of dual-phase and HSLA steels. *Materials Science and Engineering A*, 607:, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.034>

**Saha, D.C., Biro, E., Gerlich, A.P., Zhou, Y.N. 2016.** Fiber Laser Welding of Al - Si - Coated Press - Hardened Steel. Supplement to the Welding Journal , (May):, 147–156.

**Sharma, R. S., Molian, P. 2011.** Weldability of advanced high strength steels using an Yb: YAG disk laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(11):, 1888–1897. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.06.009>

**Singh, M. 2016.** Application of Steel in Automotive Industry. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(7):, 246–253. Retrieved from [www.ijetae.com](http://www.ijetae.com)

**Singla, U. 2017.** Fiber Laser Welding Benefits and Industrial Applications. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies* , 5(1):, 7–10.

**Sivagurumanikandan, N., Saravanan, S., Kumar, G. S., Raju, S. 2018.** Optik Prediction and optimization of process parameters to enhance the tensile strength of Nd : YAG laser welded super duplex stainless steel. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 157:, 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.146>

**Slovaca, A. M. 2015.** Fiber Laser Welding of Dual Phase Steels. *Acta Metallurgica Slovaca* , 21(4):, 311–320. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i4.626>

**Sokolov, M., Salminen, A., Kuznetsov, M., Tsubulskiy, I. 2011.** Laser welding and weld hardness analysis of thick section S355 structural steel. *Materials and Design*, 32(10):, 5127–5131. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.053>

**Sun, Q., Di, H. S., Li, J. C., Wang, X. N. 2016.** Effect of pulse frequency on microstructure and properties of welded joints for dual phase steel by pulsed laser welding. *Materials and Design*, 105:, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.071>

**Sun, Y., Wu, L., Tan, C., Zhou, W., Chen, B., Song, X. 2019.** Influence of Al-Si coating on microstructure and mechanical properties of fiber laser welded 22MnB5 steel. *Optics and Laser Technology*, 116(October 2018):, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.024>

**Thomas, G., Isaacs, R. 2011.** Basic principles of lasers. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 12(12):, 574–577. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2011.09.013>

**Torkamany, M. J., Malek Ghaini, F., Poursalehi, R. 2014.** Dissimilar pulsed Nd: YAG laser welding of pure niobium to Ti-6Al-4V. *Materials and Design*, 53:, 915–920. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.094>

**Turetta, A., Bruschi, S., Ghiotti, A. 2006.** Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1–3):, 396–400. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.041>

**Uzun, R. O., Keleş, Ö. 2012.** Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(3):, 509–517.

**Wang, X., Sun, Q., Zheng, Z., Di, H. 2017.** Microstructure and fracture behavior of laser

welded joints of DP steels with different heat inputs. *Materials Science & Engineering A*, 699(January):, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.078>

**Xia, M., Biro, E., Tian, Z. L., Zhou, Y. N. 2008.** Efectos de la entrada de calor y martensita en ZAC reblandecimiento de soldadura láser de aceros Dual Phase. *ISIJ International*, 48(6):, 809–814. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.809>

**Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Chen, D. L., Goodwin, F., Biro, E., Zhou, Y. 2012.** Microstructure and fatigue performance of single and multiple linear fiber laser welded DP980 dual-phase steel. *Materials Science and Engineering A*, 553:, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.091>

**Xu, W., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Chen, D. L., Goodwin, F., Zhou, Y. 2013.** Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints. *Materials and Design*, 43:, 373–383. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.017>

**Xue, X., Pereira, A., Amorim, J., Liao, J. 2017.** Effects of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Parameters on Penetration and Microstructure Characterization of a DP1000 Steel Butt Joint. *Metals*, 7(8):, 292. <https://doi.org/10.3390/met7080292>

**Yuce, C. 2018.** Yüksek Mukavemetli Çelikler ile Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

**Yuce, C., Tutar, M., Karpaz, F., Yavuz, N. 2016.** The Optimization of Process Parameters and Microstructural Characterization of Fiber Laser Welded Dissimilar HSLA and MART Steel Joints. *Metals*, 6(10):, 245. <https://doi.org/10.3390/met6100245>

**Zaefferer, S. 2007.** On the formation mechanisms, spatial resolution and intensity of backscatter Kikuchi patterns. *Ultramicroscopy*, 107(2–3):, 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2006.08.007>

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Oğuz TUNÇEL  
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırklareli / 01.01.1989  
Yabancı Dil : YÖKDİL-2018 (86.25)

### Eğitim Durumu

Lise : Kırklareli Atatürk Lisesi (Y.D.A) (2006)  
Lisans : Gazi Üniversitesi-Makine Mühendisliği (2011)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi-Makine Mühendisliği (2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Siirt Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, 2012-2013  
Uludağ Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, 2013-2019  
Siirt Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, 2019-Devam

İletişim (e-posta) : oguztuncel39@gmail.com

Yayınları :

**Aydin H., Tuncel O., Yuce C., Tutar M., Yavuz N., Bayram A. 2014.** Effect of Rotational Speed And Dwell Time on Mechanical Properties of Dissimilar AA1050-AA3105 Friction Stir Spot Welded Joints. *Material Testing*, (56), 818-825. <https://doi.org/10.3139/120.110636>

**Aydin H., Tuncel O., Yuce C., Tutar M., Yavuz N., Bayram A. 2014.** Effect of Rotational Speed and Dwell Time on Mechanical Properties of Dissimilar AA1050-AA3105 Joints Produced by Friction Stir Spot Welding. 3rd International Conference on Welding Technologies and Exhibition, Manisa, Turkey, 164-176

**Aydin H., Tuncel O., Yigit K., Balamur F., Cavusoglu O., Duzgun O. 2017.** AA6082-T6 ve AA1035-H14 Alüminyum Alaşımalarında Haddeleme Yönünün ve Çekme Deformasyon Hızının Çekme Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 81-95. <https://doi.org/uumfd.297265>

**Aydin A., Tuncel O., Tutar M., Bayram A. 2017.** Influence of Tool Pin Profile on Mechanical Properties of 6082-T6 Friction Stir Spot Welds. 3rd International Conference on Engineering and Natural Science. (ICENS 2017), Budapest, Hungary, 334-339.

**Aydin H., Tuncel O., Umur Y., Tutar M., Bayram A. 2017.** Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy AA6082-T6 Friction Stir Spot Welds. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 24, 215-227.

**Aydin H., Tuncel O. 2019.** AA7075 Alüminyum Alaşımında Çözme Tavı Sıcaklığının Yaşlanma Davranışına Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1), 317-330. <https://doi.org/10.17482/uumfd.521904>

**Aydin H., Tuncel O., Karpuz M., Aydin Ö. 2019.** Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan DP450 ve DP800 Saçlarında Deformasyon Hızının ve Haddeleme Yönünün Çekme Özelliklerine Etkisi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 323-335. <https://doi.org/10,25092/baunfbed.547171>

**Aydin H., Tuncel O., Cetin S. 2019.** Power Effect on Pulsed Nd:YAG Laser Welded DP1000 Steel Sheets. Academic Conference On Robotization, Engineering and Artificial Intelligence. Praque, Czech Republic, 194-203.

**Selova L., Aydin H., Tuncel O., Cavusoglu O. 2019.** Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Three-Sheet Stack Joints of Dissimilar Steels in Different Welding Time. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET19). Bayburt, TURKEY.

**Tuncel O., Aydin H., Tutar M., Bayram A. 2015.** Mechanical Performance of Friction Stir Spot Welded AA6082-T6 Sheets. Proceedings of 4th IASTEM International Conference, Amsterdam, Netherlands, 62-66.

**Tuncel O., Aydin H., Tutar M., Bayram A. 2016.** Mechanical Performance of Friction Stir Spot Welded AA6082-T6 Sheets. International Journal of Mechanical and Production Engineering, 4(1), 114-118.

**Tuncel O., Aydin H., Tutar M., Bayram A. 2017.** Tool Pin Geometry Effect on Fracture Characteristics of 6082-T6 Friction Stir Spot Welds in Lap Shear Test. International Conference on Advanced Engineering Technology. (ICADET'17), Bayburt, Turkey, 437-444.

**Tuncel O., Yigit K., Tutar M., Aydin H. 2017.** Mechanical Properties of Dissimilar 5754-H22/6082-T6 Aluminum Alloy Lab Joints by FSSW. 3rd International Conference on Engineering and Natural Science. (ICENS 2017), Budapest, Hungary, 61-67.

**Tuncel O., Aydin H., Cetin. 2018.** Ultra Yüksek Mukavemetli DP1000 Çeliğinin Nd:YAG Lazer Kaynağında Işın Çapı Etkisi. International Automotive Technologies Congress, (OTEKON 2018). Bursa, Turkey, 1512-1521.

**Tuncel O., Aydin H., Cetin. 2018.** Nd:YAG Lazer Kaynağı ile Birleştirilen DP600 Çeliğinde Darbe Süresinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *International Automotive Technologies Congress, (OTEKON 2018)*. Bursa, Turkey, 1503-1511.

**Tuncel O., Aydin H., Cavusoglu O., Selova L. 2019.** Effect of Electrode Force on Mechanical Properties of Triple Joined Dissimilar Steel Sheets by Resistance Spot Welding. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies (ICADET19). Bayburt, TURKEY.

**Tuncel O., Aydin H. 2019.** Tensile Properties of Resistance Spot Welded Ultra High Strength Steel Usibor 1500. International Engineering and Science Symposium. Siirt, Turkey, 1269-1275.

**Tuncel O., Aydin H., Cetin S. 2019.** Mechanical Properties of Nd:YAG Laser Welded Advanced High Strength DP1000 Steel at Different Pulse Duration Times. International Engineering and Science Symposium. Siirt, Turkey, 821-830.

**Tuncel O., Aydin H., Cetin S. 2019.** Tensile Properties of Pulsed Nd:YAG Laser Welded Dissimilar DP600-DP1000 Steel Sheets. Alternative Energy Sources, Materials and Technologies (AESMT219). Sofia, Bulgaria, (1), 111-112.

**Tuncel O., Aydin H., Cetin. 2019.** Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Similar and Dissimilar DP Steel Sheets. Alternative Energy Sources, Materials and Technologies (AESMT219). Sofia, Bulgaria, (1), 109-110.

**Tuncel O., Aydin H., Selova L. 2019.** Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Dissimilar Steels Joined Triple by Electrical Resistance Spot Welding. Fourth International Iron and Steel Symposium, (UDCS'19). Karabuk, Turkey, 396-400.

**Tuncel O., Aydin H. 2020.** A Comparison of Tensile Properties of Single-Sided and Double Sided Laser Welded DP600 Steel Sheets. *Materials Science (Medziagotyra)*, 26(2), 173-178. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.2.21374>

**Tuncel O., Aydin H., Cetin S. 2020.** Effect of Laser Power on Mechanical and Microstructure Properties of Pulsed Nd:YAG Laser Welded Dissimilar DP600-DP1000 Steel Sheets. *European Mechanical Science*, 4(1), 41-46. <https://doi.org/10.26701/ems.632173>

**Tuncel O., Aydin H., Cetin S. 2020.** Microstructure and Mechanical Properties of Nd:YAG Laser Welded Dissimilar DP600-DP1000 Steel Sheets. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(1), 155-164. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.620768>

**Tutar M., Aydin H., Yuce C., Tuncel O., Yavuz N., Bayram. 2014.** Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Spot Welded AA5754 Aluminum Alloys. International Materials Symposium (IMSP'2014), Denizli, Turkey.

