

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK  
MUKAVEMETLİ DP1200 ÇELİĞİNDE LAZER KAYNAK  
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**Meryem ALTAY**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ  
DP1200 ÇELİĞİNDE LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN  
OPTİMİZASYONU**

Meryem ALTAY  
0000-0001-6930-6292

Prof. Dr. Hakan AYDIN  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ ONAYI

Meryem ALTAY tarafından hazırlanan “OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP1200 ÇELİĞİNDE LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Hakan AYDIN

**Başkan** : Prof. Dr. Hakan AYDIN İmza  
0000-0001-7364-6281  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN İmza  
0000-0003-1739-1143  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Üye** : Doç. Dr. Onur SARAY İmza  
0000-0002-9378.3870  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**  
**28/12/2021**

**B.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.**

**28/12/2021**

**Meryem ALTAY**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Hakan AYDIN  
28/12/2021

Meryem ALTAY  
28/12/2021

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP1200 ÇELİĞİNDE LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

**Meryem ALTAY**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Hakan AYDIN

Otomotiv sektörü yapısal parçalarda ultra yüksek mukavemetli çelik sacların kullanımı ile, bu çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri önem kazanmıştır. Lazer kaynak yönteminin, yüksek güce sahip lazer ışınını dar bir alana odaklaması sayesinde avantajları bulunmaktadır: derin nüfuziyet, yüksek dayanım, istenilen kaynak geometrisinin elde edilmesi, hassas ve yüksek kalitede birleştirme. İstenilen düzeyde mekanik özelliklerin elde edilebilmesi, uygun proses parametrelerinin kullanılması ile mümkündür.

Bu çalışma kapsamında otomotiv endüstrisine yönelik yüksek mukavemetli DP1200 çeliklerin fiber lazer kaynak birleştirmelerinde lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısı proses parametrelerinin ısı girdisi değişimine göre kaynak geometrisi, mikro yapı, mikro sertlik, kırılma yüzeyleri, çekme mukavemeti üzerine etkileri araştırılmıştır. Merkezi Kompozit Tasarımı ile 3 parametre 5 seviye için deney tasarımı oluşturulmuş, çekme testi sonrası kontür ve yüzey grafikleri çizilmiştir. Maksimum kayma kuvveti amaç fonksiyonu olmak üzere Yanıt Yüzey Metodolojisine göre Minitab programı yardımıyla optimum proses parametreleri ve parametrelerin etki oranları belirlenmiş, matematiksel denklem elde edilmiştir. Termal kamera ile kayıt altına alınan lazer kaynak işleminde, veriler analiz edilerek belirlenen noktalar için soğuma hızları hesaplanmıştır. Simufact Welding programı ile kaynak sonrası gerilme ve deplasman değerleri simüle edilmiştir.

Yanıt Yüzey Metodolojisi optimum proses parametreleri lazer gücü 2800 W, ilerleme hızı 40 mm/s, lazer açısı 70°; etkin parametreler sırası ile ilerleme hızı, lazer açısı ve lazer gücüdür. Isı girdisindeki azalma ile tane yapısının ve martenzitlerin inceleştigi, ısı girdisindeki artış ile tane yapısının ve martenzitlerin kabalaştığı gözlemlenmiştir. Düşük ısı girdisinde yüksek soğuma hızı ile yüksek mikro sertlik; yüksek ısı girdisinde düşük soğuma hızı ile düşük mikro sertlik değerleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaynağı, DP1200 çeliği, kaynak parametreleri, mekanik özellikler, mikro yapı, optimizasyon, simülasyon

## ABSTRACT

MSc Thesis

### OPTIMIZATION OF LASER WELDING PARAMETERS OF HIGH STRENGTH DP1200 STEEL FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

**Meryem ALTAY**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Hakan AYDIN

With the use of ultra-high strength steel sheets in automotive sector structural parts, the welded joints of these steels have gained importance. The laser welding process has several advantages thanks to focusing the high-power laser beam in a narrow area: deep penetration, high strength, obtaining the desired weld geometry, precise and high-quality joining. Achieving the desired level of mechanical properties is possible with the use of appropriate process parameters.

In this study, the effects of laser power, scanning speed, laser angle process parameters on weld geometry, microstructure, microhardness, fracture surfaces, and tensile strength were investigated in terms of heat input change in fiber laser welding joints of high-strength DP1200 steels. The experimental design was created for 3 parameters and 5 levels via Central Composite Design and contour and surface graphics were plotted after the tensile test. For maximum shear force objective function, optimum process parameters and parameter affect ratios were determined according to the Response Surface Methodology using the Minitab program, and a mathematical equation was obtained. The laser welding process has recorded with a thermal camera, cooling rates were calculated by analyzing the data. Post-weld stress and displacement values were simulated with the Simufact Welding program.

Response Surface Methodology optimum process parameters laser power was 2800 W, scanning speed was 40 mm/s, laser angle was 70°; the effective parameters were scanning speed, laser angle, and laser power, respectively. It was observed that the grain structure and martensites got thinner with the decreasing heat input, and the grain structure and martensites became coarser with the increasing heat input. High microhardness with high cooling rate were obtained at low heat input; low microhardness values were seen with low cooling rate at high heat input.

**Key words:** Laser welding, dual phase steels, welding parameters, mechanical properties, microstructure, optimization, simulation  
**2021, vii + 138 pages.**

## TEŞEKKÜR

Akademik hayatım ve yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi birikimi ile fikir veren, hayat deneyimi ile doğru yolu gösteren danışman hocam Prof. Dr. Hakan AYDIN'a teşekkür ederim.

OUAP (MH)-2019-6 numaralı bilimsel araştırma projesi ile yüksek lisans tez çalışmamı destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Fiber lazer kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen LASER ISSE firması, Selahattin Burak ÇELİKKAYA ve Utku ERDİNÇ'e teşekkür ederim.

Akademik ve kültürel gelişimimde üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime, aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Meryem ALTAY  
28/12/2021



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
2.1. Lazer Tanımı ve Tarihçesi.....	2
2.2. Lazer Işını Oluşumu ve Lazer Sistemleri.....	3
2.3. Lazer Türleri.....	5
2.3.1. Gaz Lazerler.....	5
2.3.2. Katı Hal Lazerleri.....	6
2.3.3. Yarı İletken Lazerler.....	7
2.4. Lazer Kaynak Yöntemi.....	8
2.5. Lazer Kaynak Parametreleri.....	10
2.6. Çift Fazlı Çelikler.....	13
2.7. Deney Tasarımı ve Optimizasyon Yöntemleri.....	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	19
3.1. Materyal.....	19
3.2. Yöntem.....	19
3.2.1. Lazer Kaynak Cihazı.....	19
3.2.2. Deney Tasarımı ve Lazer Kaynak Uygulaması.....	21
3.2.3. Metalografik İnceleme.....	24
3.2.4. Mikrosertlik Ölçümü.....	25
3.2.5. Çekme Testi.....	26
3.2.6. SEM Analizi.....	28
3.2.7. Termal Analiz.....	28
3.2.8. Simufact Analizi.....	29
4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA).....	31
4.1. Ön Deneme Çalışma Sonuçları.....	31
4.2. Kaynak Dikiş Yüzeyi İncelemeleri.....	32
4.3. Kaynak Geometrisi İncelemeleri.....	36
4.3.1. Isı Girdisi ve Lazer Açısına Göre Kaynak Geometrisinin İncelenmesi.....	40
4.4. Kaynak Bölgelerinin Mikro Yapı İncelemeleri.....	44
4.5. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	50
4.6. Mekanik Dayanım İncelemeleri.....	59
4.7. Yanıt Yüzey Metodolojisine Göre Optimizasyon Çalışması.....	62
4.8. Kırılma Yüzeyi SEM İncelemeleri.....	69
4.9. Termal Analiz.....	78
4.10. Simufact Analizi.....	93
5. SONUÇ.....	98
KAYNAKLAR.....	102
EKLER.....	110
EK 1 “1”, “2”, “3” numaralı numuneler için Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri ....	112



EK 19 “20” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 .....	130
EK 20 “2” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	131
EK 21 “3” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman, j) elastik şekil değiştirme, j) plastik şekil değiştirme .....	132
EK 22 “4” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	133
EK 23 “8” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	134
EK 24 “13” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	135
EK 25 “14” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	136
EK 26 “15” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	137
ÖZGEÇMİŞ .....	138

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

Simgeler	Açıklama
$E$	Enerji Seviyesi
$h$	Planck Sabiti
$\nu$	Frekans
$\lambda$	Dalga Boyu
$\eta$	Yanıt Verim Değeri
$\beta$	Yanıt Yüzey Metodolojisi Bilinmeyen Parametre

### Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
ANOVA	Anaysis of Varience – Varyans Analizi
EB	Erime Bölgesi
HSLA	High Strength Low Alloy – Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelik
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
AK-ITAB	Alt Kritik Isı Tesiri Altındaki Bölge
DP	Dual Phase – Çift Fazlı
İH	İlerleme Hızı
İK-ITAB	İnter Kritik Isı Tesiri Altındaki Bölge
İT-ITAB	İnce Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge
KT-ITAB	Kaba Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge
LA	Lazer Açısı
LG	Lazer Gücü
M	Martenzit
Nd: YAG	Neodymium Doped Yttrium Aluminum Garned-Neodyum Katkılı İtiryum Alüminyum Garnet
RSM	Response Surface Method – Yanıt Yüzey Metodolojisi
SEM	Scanning Electron Microscope -Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Transmission Electron Microscope – Geçirimli Elektron Mikroskobu
TM	Temel Malzeme
TRIP	Transformation Induced Plasticity- Dönüşüm ile Plastisite

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Atom uyarılma mekanizmaları a) kendiliğinden emisyon, b) absorpsiyon, c) uyarılmış emisyon .....	4
Şekil 2.2. Lazer sistemi şematik gösterim (Jelinkova ve Sulc 2013).....	5
Şekil 2.3. Lazer kaynak yöntemi şematik gösterim (Ai ve ark. 2017).....	8
Şekil 2.4. Lazer ışını geliş açısına göre kaynak havuzu değişimi (Kumar ve ark. 2017).....	12
Şekil 3.1. Lazer kaynak cihazı ve termal kamera ekipmanları .....	20
Şekil 3.2. Lazer kafası ve pilot lazer ışını .....	20
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan bindirme kaynağı şematik gösterimi .....	21
Şekil 3.4. Lazer kaynak işlemi öncesi uygulanan punto kaynak noktaları .....	21
Şekil 3.5. (a) Metkon Ecopress numune kalıplama cihazı, (b) Metkon Forcipol zımparalama-parlatma cihazı, (c) Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu.....	25
Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan Metkon Duroline-M sertlik ölçüm cihazı.....	26
Şekil 3.7. Vickers mikro sertlik ölçüm hatları .....	26
Şekil 3.8. Çekme deneyi numune boyutları .....	27
Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan UTEST-7014 üniversal çekme test cihazı.....	27
Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan ZEISS EVO®40 XVP taramalı elektron mikroskobu .....	28
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan OPTRIS PI450i termal kamera .....	29
Şekil 3.12. Simufact Welding lazer bindirme kaynak bağlantısı .....	30
Şekil 4.1. Ön deneme çalışması ile elde edilen lazer kaynaklı bağlantılar (“1” numaralı numune ısı girdisi: 35,71 J/mm, “2” numaralı numune ısı girdisi: 37,60 J/mm, “3” numaralı numune ısı girdisi: 45,45 J/mm, “4” numaralı numune ısı girdisi: 62,5 J/mm) .....	31
Şekil 4.2. Lazer kaynak dikişi ilerleme yönüne ters dışbükey yapı .....	33
Şekil 4.3. Numunelerin kaynak dikişi morfolojileri ön yüzey görüntüleri .....	34
Şekil 4.4. Numunelerin kaynak dikişi morfolojileri arka yüzey görüntüleri .....	35
Şekil 4.5. Kaynaklı numunede mikro yapı bölgeleri (EB: Erime Bölgesi, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme) .....	36
Şekil 4.6. Kaynaklı numunelerin genel mikro yapı görüntüleri.....	37
Şekil 4.7. Numunelerin erime bölgesi tam birleşme durumları .....	39
Şekil 4.8. Eşit ısı girdisinde lazer açısı değişiminin kaynak geometrisine etkisi.....	42
Şekil 4.9. Eşit lazer açısında ısı girdisi değişiminin kaynak geometrisine etkisi.....	43
Şekil 4.10. “1”, “2” ve “3” numaralı numunelerin genel mikro yapı görüntüleri (a:KT-ITAB, b: İT-ITAB, c: İK-ITAB, d:AK-ITAB) .....	46
Şekil 4.11. “1” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	47
Şekil 4.12. “2” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	47
Şekil 4.13. “3” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	47
Şekil 4.14. “1” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	48
Şekil 4.15. “2” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	49
Şekil 4.16. “3” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri .....	50
Şekil 4.17. “1” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri.....	53
Şekil 4.18. “2” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri.....	54

Şekil 4.19. “3” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri.....	55
Şekil 4.20. “4” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	57
Şekil 4.21. “8” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	57
Şekil 4.22. “13” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	58
Şekil 4.23. “14” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	58
Şekil 4.24. “15” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi .....	59
Şekil 4.25. a) Maksimum kopma kuvveti grafiği, b) EB tam birleşme mesafesi grafiği	61
Şekil 4.26. Tahmini kayma kuvveti ile çekme deneyi sonucundaki deneysel verilerin karşılaştırılması .....	64
Şekil 4.27. a) Lazer gücü ve ilerleme hızı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) Lazer gücü ve ilerleme hızı arasındaki ilişki kontür grafiği .....	66
Şekil 4.28. a) İlerleme hızı ve lazer açısı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) İlerleme hızı ve lazer açısı arasındaki ilişki kontür grafiği .....	67
Şekil 4.29. a) Lazer gücü ve lazer açısı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) Lazer gücü ve lazer açısı arasındaki ilişki kontür grafiği .....	68
Şekil 4.30. “1” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	71
Şekil 4.31. “2” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.32. “3” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	73
Şekil 4.33. “4” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	74
Şekil 4.34. “8” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	75
Şekil 4.35. “13” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	76
Şekil 4.36. “14” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	77
Şekil 4.37. “15” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	78
Şekil 4.38. Termal kamera analizi için belirlenen noktalar .....	78
Şekil 4.39. “1” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi .....	79
Şekil 4.40. “2” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi .....	79
Şekil 4.41. “3” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi .....	79
Şekil 4.42. “1” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme) .....	83
Şekil 4.43. “1” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5).....	83
Şekil 4.44. “2” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme) .....	84
Şekil 4.45. “2” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5).....	84
Şekil 4.46. “3” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme) .....	85
Şekil 4.47. “3” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5).....	85
Şekil 4.48. “1” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	89
Şekil 4.49. “2” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	89
Şekil 4.50. “3” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	90
Şekil 4.51. “4” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	90
Şekil 4.52. “8” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	91

Şekil 4.53. “13” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	91
Şekil 4.54. “14” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	92
Şekil 4.55. “15” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği.....	92
Şekil 4.56. Simufact programı arayüzü ve X, Y, Z doğrultularının gösterimi.....	93
Şekil 4.57. “1” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme .....	96
Şekil 4.58. Kaynak bölgesi simulasyon çıktıları ile gerçek mikro yapı karşılaştırması a) “1” numaralı numune, b) “2” numaralı numune, c) “3” numaralı numune, d)“4” numaralı numune, e) “8” numaralı numune, f) “13” numaralı numune, g) “14” numaralı numune, h) “15” numaralı numune .....	97

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. DP1200 malzemenin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) .....	19
Çizelge 3.2. Lazer kaynak proses parametreleri ve belirlenen seviye aralıkları .....	22
Çizelge 3.3. Response Surface Method yöntemine göre oluşturulan deney tasarımı .....	23
Çizelge 3.4. Ön deneme çalışmalarında kullanılan parametreler .....	24
Çizelge 4.1. Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgileri .....	40
Çizelge 4.2. Çekme testi sonrasında elde edilen maksimum kayma kuvveti, birim başına taşınan yük, uzama değerleri .....	60
Çizelge 4.3. Yanıt yüzey metodolojisine göre Anaysis of Variance (ANOVA) sonuçları (LG: Lazer Gücü, İH: İlerleme Hızı, LA: Lazer Açısı) .....	63
Çizelge 4.4. Tahmini kayma kuvveti ile deneysel çıktılar karşılaştırılması .....	63
Çizelge 4.5. Maksimum kayma kuvveti amaç fonksiyonuna göre elde edilen optimum proses parametreleri .....	65
Çizelge 4.6. Kaynak yüzeyinde kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme için elde edilen maksimum sıcaklıklar .....	81
Çizelge 4.7. Kaynak yüzeyinde Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 için elde edilen maksimum sıcaklıklar .....	82
Çizelge 4.8. Deney numunelerinin hesaplanan soğuma hızı değerleri (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme) .....	86
Çizelge 4.9. Deney numunelerinin hesaplanan soğuma hızı değerleri (Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5) .....	87
Çizelge 4.10. Simufact welding termomekanik analiz sonuçları .....	95



## 1. GİRİŞ

Yüksek güce sahip lazer ışınları ile malzemelerin ergitilmesi prensibine dayanan lazer kaynak yönteminin derin nüfuziyet yüksek dayanım, istenilen kaynak geometrisinin elde edilebilmesi, düşük ısı girdisi oluşturarak dar bir ITAB yaratması, seri üretime ve otomasyona uygunluk, ek malzeme ve işlem gerektirmemesi gibi özellikleri sayesinde otomotiv sektöründeki kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Otomotiv sektöründe güvenliğin ön planda olduğu kritik parçalarda, çalışma performansı ve darbe dayanımı açısından ultra yüksek mukavemetli çelikler tercih edilmektedir. Otomobilde kullanım yerine ve istenilen özelliklere göre farklı mukavemet ve uzama değerlerine sahip çelik malzemeler seçilmekte, genellikle Dual Phase (DP) çelikleri kullanılmaktadır. DP çelikleri mukavemet ve şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri ile ön plana çıkmakla birlikte kaynaklı birleştirmeleri otomotiv parçalarında kritik öneme sahiptir. Kaliteli bir kaynaklı bağlantı ve isterleri karşılayan mekanik özelliklere ulaşılabilmesi için parametrelerin kontrol edilerek uygun değerlerin belirlenmesi ve metalurjik incelemelerin yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ultra yüksek mukavemetli DP 1200 çelik saclar fiber lazer kaynak yöntemi ile bindirme formunda boşluksuz birleştirilmiştir. Etkin parametreler olan lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısı için otomotiv sektöründe kullanılmakta olan parametre değerleri seçilerek deney tasarımı oluşturulmuştur. Kaynaklı bağlantılar mikro yapı, mikro sertlik, kırılma yüzeyleri, mekanik özellikler açısından incelenmiş, Yanıt Yüzey Metodolojisine göre parametreler optimize edilmiştir. Lazer kaynak işlemi termal kamera ile kayıt altına alınmış ve termal analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyon yardımıyla kaynak sonrası gerilme ve deplasman miktarları hakkında bilgi edinilmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Lazer Tanımı ve Tarihçesi

Lazer kelimesi, İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinin kısaltılmasından oluşmaktadır; uyarılmış ışınım yayılımı ile ışığın yükseltilmesi anlamına gelmektedir.

Lazer prensibi, “The Quantum Theory of Radiation” makalesiyle ilk olarak Albert Einstein tarafından açıklanmıştır: uyarılmış emisyonun lazer radyasyonu üreten temel bir fizik olayı olduğunu belirtmiştir (Einstein 1917). Sonraki yıllarda Columbia Üniversitesinde “Maser” keşfedilmiştir; İngilizce “Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin kısaltmasıdır (Gordon ve ark. 1954). Uyarılmış emisyon prensibine dayanan cihaz 1964 yılında Nobel fizik ödülü almıştır. Birbirinden bağımsız Maryland Üniversitesi’nde aynı yıllarda Maser keşfedilmiştir (Weber 1953). “Optik Mazer” kavramının tanımlanması ile birlikte lazer keşfedilmiştir (Schawlow ve Townes 1958) ve patenti alınmıştır (Patent No: 2929922).

Hughes Araştırma Laboratuvarı’nda enerji kaynağı olarak flaş lambası, kazanç ortamı olarak katı hal yakut kristali kullanılan Ruby Lazer (Maiman 1960); IBM Laboratuvarı’nda uranyum katkılı kalsiyum florür lazeri keşfedilmiştir (Sorokin ve Stevenson 1960). Bell Laboratuvarları’nda optik rezonatörlerin teorik analizi yapılmış (Fox ve Li 1961), Helyum-Neon Lazer, Nd: YAG Lazer ve CO<sub>2</sub> Lazer icat edilmiştir (Javan ve ark. 1961, Geusic ve ark. 1964, Patel 1964).

Lazer diyotlarda çift heteroyapı kullanılmış (Alferov 1970), buluş Nobel ile ödüllendirilmiştir. Laboratuvar ortamında X-ışını lazeri keşfedilerek raporlanmıştır (Matthews ve ark. 1985). Tarihçesinden bahsedilen lazerlerin dışında Argon-İyon, CO, Zn-Cd, metal buhar, inert gaz, serbest elektron, excimer (XeCl, KrF), Yb: YAG, Er: YAG, Nd: cam, boya lazeri gibi çeşitli türler bulunmaktadır; lazerler otomotiv endüstrinin yanı sıra savunma sanayii ve sağlık alanlarında kullanılmaktadır.

## 2.2. Lazer Işını Oluşumu ve Lazer Sistemleri

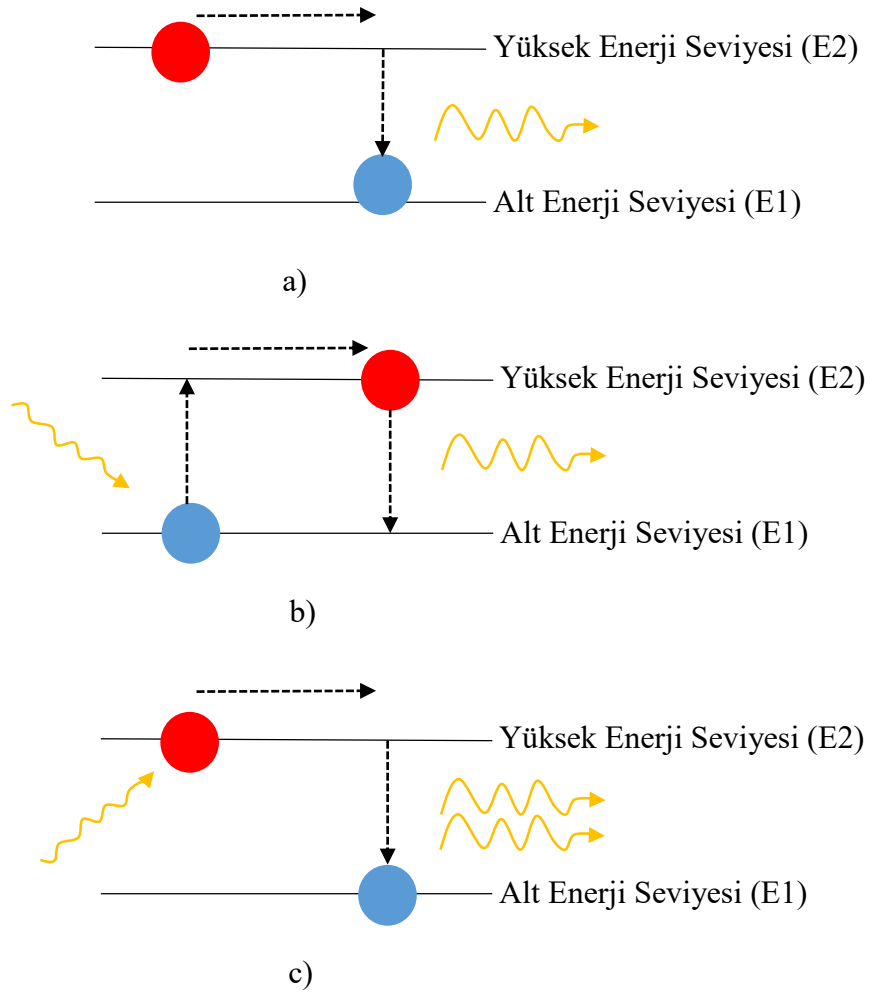
Lazer ışını yüksek genlikli, birbirine paralel, tek renkli, aynı faz ve frekanstaki dalgalardan oluşmaktadır; atomların aktif bir ortamda ışık kaynağının elektromanyetik alanı ile etkileşmesi sonucu oluşmaktadır. Atomlar, taban enerji seviyesi (E1) olarak adlandırılan minimum enerji seviyesinde olma eğilimindedir, uyarılma (ısıtma, basınç, elektron ya da parçacık bombardımanı, ışık demetinin etkisine maruz bırakma) mekanizmaları ile yüksek enerji seviyesine (E2) ulaşmaktadır. Yüksek enerji konumuna geçen atom “uyarılmış atom” olarak adlandırılmaktadır, atom uyarılmasının 3 koşulu bulunmaktadır: kendiliğinden emisyon, absorpsiyon ve uyarılmış emisyon (Steen ve Mazumder 2010).

Uyarılmış ve yüksek enerji seviyesinde (E2) bulunmakta olan atom, alt enerji seviyesine (E1) geçme eğilimindedir. Bu durum kendiliğinden emisyon olarak adlandırılır; “E2-E1” değerindeki kadar enerji, foton olarak yayılmaktadır (Şekil 2.1.a). Yayılan fotonun frekansı Eşitlik 2.1 ile hesaplanabilir, burada "h" Planck sabitidir ( $h = 6,623 \cdot 10^{-32}$ ).

$$v = \frac{E2 - E1}{h} \quad (2.1)$$

Düşük enerji seviyesindeki (E1) bir atoma foton çarpmasıyla, fotonun enerjisi absorbe edilmekte ve atom yüksek enerji seviyesine (E2) ulaşmaktadır. Minimum enerji seviyesine geçme eğilimindeki atom, tekrar taban enerji düzeyine inebilmek için foton yayılımı gerçekleştirecektir. Bu durum absorpsiyon olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1.b).

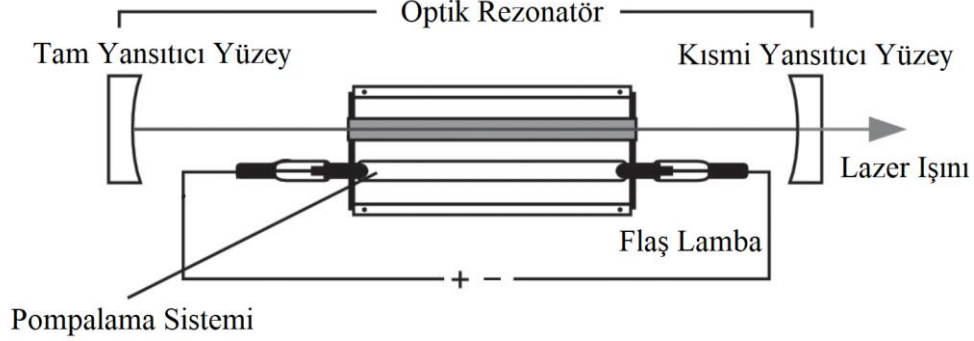
Uyarılmış emisyon durumunda ise yüksek enerji seviyesinde (E2) bulunmakta olan atoma, foton çarpması ile alt enerji seviyesine (E1) düşmektedir. Çarpan fotonun enerjisine E2-E1 enerji seviye farkı eklenerek eşit frekansa ve enerjiye sahip 2 adet foton yayılımı gerçekleşmektedir (Şekil 2.1.c).



**Şekil 2.1.** Atom uyarılma mekanizmaları a) kendiliğinden emisyon, b) absorpsiyon, c) uyarılmış emisyon

Uyarılma mekanizmalarının sürekliliği sağlanarak ışın demeti elde edilir, paralel ışınlar bir noktadan yayılarak yüksek enerjiye sahip lazer ışınını oluşturur. Lazer sistemi aktif malzeme, pompalama kaynağı ve optik rezonatör ana bölümlerinden oluşmaktadır. Aktif madde ortamı kristal iyonlar ( $Fe^{+2}$ ,  $Dy^{+2}$ ,  $Cr^{+3}$ ,  $Ti^{+3}$ ,  $Nd^{+3}$ ,  $Pr^{+3}$ ,  $Dy^{+3}$ ,  $Ho^{+3}$ ,  $Er^{+3}$ ,  $Tm^{+3}$ ,  $Yb^{+3}$ ), gaz atomları (Cu, Ne, I), iyon (Cd, Ar), molekül (ArF, CO,  $CO_2$ ), yarı iletken veya çoklu iyonize plazma atomlarından oluşabilir. Enerji kaynağının pompalanması ile lazer aktif ortamına gerekli enerji sağlanmaktadır. Pompalama için flaş lambadan gelen ışık, başka bir lazerden gelen radyasyon ya da elektron çarpışmalarına neden olacak bir kimyasal reaksiyon gerekmektedir. Optik rezonatör ise lazer oluşumu için bir geri besleme mekanizmasıdır, iki ya da daha fazla yansıtıcı

yüzeiden oluşmaktadır. Yüzeilerden biri tamamen yansıtıcı diğeri yarı geçirgendir ve lazer ışın demeti yarı geçirgen aynadan çıkış yapmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Lazer sistemi şematik gösterim (Jelinkova ve Sulc 2013)

### 2.3. Lazer Türleri

Lazerler oluştuğu ortam türüne göre isimlendirilmektedir, lazer türüne göre aktif ortam ve ışık kaynağı değişiklik göstermektedir. Lazer ışınını üretecek olan aktif ortam gaz, katı, sıvı veya yarı iletken olabilir (Dahotre ve Harimkar 2008). Pompalama kaynağı ise aktif ortama göre değişiklik göstermektedir: katı ve sıvı lazerlerde optik pompalama ile, gaz ve yarı iletken lazerlerde elektrik akımı ile uyarılma gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde lazer çeşitleri açıklanmıştır (Jelinkova ve Sulc 2013).

#### 2.3.1. Gaz Lazerler

Karbondioksit, karbonmonoksit, excimer lazer türleri bulunmaktadır. Karbondioksit lazerde gaz karışımı ( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $He$ ) elektrik boşalmasına maruz kalarak plazma oluşturur ve uyarılmış emisyon için uygun bir ortam sağlanmış olur.  $N_2$ 'nin bir deşarj tüpünde uyarılarak  $CO_2$  molekülü ile çarpıştırılmasıyla uyarılmış emisyon oluşmaktadır, verimliliği % 15- % 20 civarındadır. Karbonmonoksit lazerler ise karbondioksit lazer çalışma prensibine benzerdir, gaz karışımına Xenon eklenerek daha yüksek sıcaklıkta çalışma sağlanmıştır.

Excimer lazerlerde gaz karışımı (Ar, Kr, Xe, He) soygazlardan oluşmaktadır. Gaz karışımında kısa süreli darbe ile uyarılmış ikili moleküller (ArF, KrCl, KrF, XeCl) yardımıyla elektrik deşarjı meydana getirilerek fotonlar üretilmektedir. Darbeler genellikle kısa ve rezonans salınımı olmadığından excimer lazerlerin verimi düşüktür. Lazer ışınını sürekli olarak üreten sistemler sürekli dalga lazer, periyodik darbeler ya da atımlar halinde üreten sistemler ise darbeli lazer olarak adlandırılmaktadır.

### 2.3.2. Katı Hal Lazerleri

Gaz lazerler ile kıyaslandığında yüksek enerji depolama, kısa darbelerde yüksek tepe noktasına ulaşabilme, uzun ömür özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Katı hal lazerlerinde aktif bir yalıtkan kristal kullanılmaktadır. Endüstriyel katı hal lazerleri  $Nd^{+3}$ : YAG,  $Er^{+3}$ : YAG,  $Yb^{+3}$ : YAG, Yakut ( $Cr^{+3}$ :  $Al_2O_3$ ), Titanyum Safir ( $Ti^{+3}$ :  $Al_2O_3$ ) kristallerinden oluşmaktadır. Neodimyum elementleri için ana malzeme YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), İtiryum Lityum Florür (YLF), İtiryum Alüminyum Perovskit (YAP;  $YAlO_3$ ), İtiryum Vanadat (YVO4), fosfat veya silika cam olabilir. Nd: YAG, disk lazer, fiber lazerler endüstride en çok kullanılan katı hal lazer çeşitleridir.

Nd: YAG lazeri sanayide en çok kullanılan lazerlerden biridir. Neodimyum ve Yttrium Aluminium Granat kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir.  $Y_3Al_5O_{12}$  kristal yapısına sahip, dalga boyu ( $\lambda$ ) 1064 nm'dir. Aktif ortam  $Nd^{+3}$  iyonları olan bir YAG kristal çubuğu, altın kaplama veya alüminadan yapılmış yansıtıcı yüzeylerin farklı odaklarına yerleştirilmiştir. Flaş lamba ile  $Nd^{+3}$  iyonları uyarılarak absorbe edilir ve pompalama işlemi gerçekleştirilmiş olur. YAG lazerinde termal etkiler dolayısıyla soğutma yapmak gereklidir bu nedenle çubuk uzunluğu sınırlıdır. Endüstride kaynak, delme, metallerin mikro işleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Lazer ışını sürekli dalga ya da darbeli şekilde üretilebilmektedir. Sürekli dalga lazer ışını, endüstriyel uygulamalarda kullanılırken darbeli lazerler kısa atım sürelerine sahip olmalarıyla delme işlemlerinde kullanılmaktadır. Fiber kablolar vasıtasıyla aktarılabilme özelliğine sahiptir, robotik ve otomasyon sistemlerine uygundur.

Disk lazerler İtterbiyum katkılı YAG kristalinin lazer ortamını oluşturduğu bir lazer türüdür, YAG maddesi disk şeklindedir,  $Nd^{+3}$ 'yü uyarmak için flaş lambalar yerine diyot lazerler kullanılmaktadır. 1,03  $\mu\text{m}$  dalga boyunda lazer ışını üretilmektedir. Üstün soğuma, yüksek güç ve geometri farkı nedeniyle yüksek verimliliğe sahiptir ancak maliyetleri yüksektir.

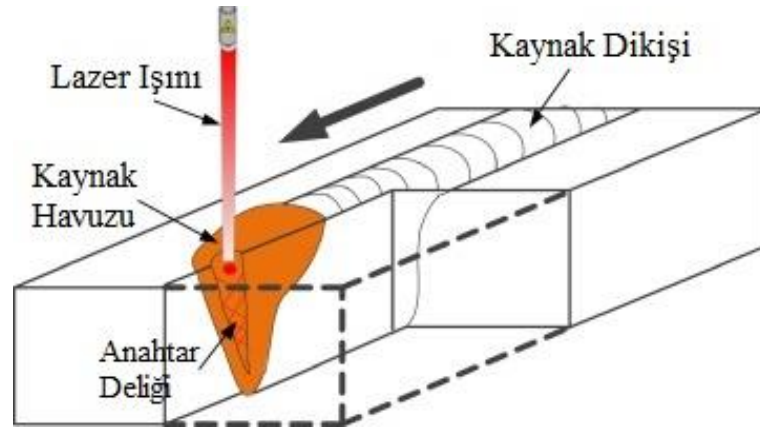
Fiber lazerler diyot pompalı olarak geliştirilmiştir; aktif ortam olarak Erbiyum ve İterbiyum kullanılmakta, dalga boyu 1,07  $\mu\text{m}$ 'dir. Fiber boyutları küçük olduğundan (100  $\mu\text{m}$ 'e kadar) dar bir odak çapı içinde yoğunlaştırılmıştır, doğrusallık özelliğine sahiptir. Diyot ömrü fazla olduğundan uzun süre bakım gerektirmemektedir. Nd: YAG lazere kıyasla çok daha iyi ışın kalitesine sahiptir. Lazer ışınının işlenecek malzemeye fiber optik kablolar yardımıyla aktarımı, esnek çalışma koşullarına uyum avantajını getirmektedir.

### **2.3.3. Yarı İletken Lazerler**

Yarı iletken lazerlerde, farklı türde yan yana getirilen iki yarı iletken malzemenin ara kesitinde negatif ve pozitif olarak ayrılmış bölgenin elektrik akımı ile uyarılması sonucu fotonlar yayılmaya başlar. Bu yöntemi kullanarak pompalanan yarı iletken lazerler lazer diyot olarak adlandırılmaktadır. Galyum Arsenik en çok kullanılan yarı iletken lazerdir. Düşük maliyetli, küçük boyutlu, yüksek verimliliğe sahip olmasıyla günlük hayatta birçok alanda kullanılmaktadır: CD ve DVD oynatıcılar, barkod okuyucular, LED ampuller, lazer yazıcılar, trafik ışıkları.

## 2.4. Lazer Kaynak Yöntemi

Lazer kaynak teknolojisinde, yüksek enerjiye sahip lazer ışını hareket ettirilerek kaynak yapılması istenen yüzeye aktarılır, malzemelerin ergitilerek birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır, yöntem şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek penetrasyon, yüksek mekanik dayanım, düşük distorsiyon, korozyona dayanım özellikleri nedeniyle tercih edilmekte ve diğer geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Robotik sistemlere uygunluğu sayesinde hassas ve yüksek kalitede kaynak elde edilebilmektedir. Yüksek ilerleme hızlarına erişilebilmesi ile hızlı üretim yapılabilir, seri üretime uygundur. Kaynak yapılacak bölgeye yeteri kadar ısı girdisi sağlanarak dar bir alanda ergime gerçekleştirilmesi sayesinde dar bir ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) genişliği elde edilmektedir. Yüksek ısı girdisine maruz kalmaması nedeniyle malzeme tane yapısı deformasyondan korunmaktadır. Kaynak işleminde ek malzemeye ihtiyaç duyulmamakta, sonrasında da herhangi bir işlem gerektirmemektedir. Ancak kaynak metalinin yansıtma özelliğinin yüksek olması, lazer kaynak işleminin verimini olumsuz etkilemektedir. Yatırım maliyetlerinin yüksek olması da dezavantajları arasındadır.



**Şekil 2.3.** Lazer kaynak yöntemi şematik gösterim (Ai ve ark. 2017)

Lazer kaynağının medikal, havacılık, elektrik ve elektronik, makine ve otomotiv sektörlerinde kullanım alanı bulunmaktadır. Uçak ve gemi üretiminde lazer kullanımı ile daha hafif, kaliteli ve güvenli imalat yapılabilir. Kalın çelikler yerine yüksek alaşım, mukavemetli ve korozyona dayanıklı ince çelik levhaların lazer kaynak



yöntemi ile birleştirilmesi mümkündür. Otomotiv sektöründe ise yeni nesil otomotiv gövde parçalarının üretiminde yaygın yaygın olarak kullanılmaktadır; güvenlik açısından kritik parçaların birleştirilme yöntemi olarak lazer kaynak tercih edilmektedir (Evin ve ark. 2015). Yüksek darbeye dayanıklı otomobil parçaları, tampon, motor bölmesi rayı, ön ve yan paneller, B sütunu, kapı takviyeleri, yan kirişler ve tekerlek jantlarında lazer kaynak kullanılmaktadır. (Bandyopadhyay ve ark. 2014, Guo ve ark. 2020, W. Li ve ark. 2018, Lun ve ark. 2017, Parkes ve ark. 2014a, 2013).

Literatürde, fiber lazer kaynak uygulamaları için pek çok çalışma örneği bulunmaktadır. Yüksek mukavemetli galvaniz kaplamalı çeliklerin otomotiv parçalarında kullanımına yönelik bindirme formunda fiber lazer kaynak deneysel çalışmaları yapılmıştır, kaynak işlemi yüksek hızlı bir video kamera ile kayıt altına alınmıştır (Chen ve ark. 2014). Kaynaklı bağlantının metalografik incelemeleri yapılmış, mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kamera verileri, ergiyik havuz ve metal buharlaşma davranışlarını incelemek için kullanılmıştır (Chen ve ark. 2014). Yüksek mukavemetli galvanizli çeliklerin otomobil parçalarında kullanımının uygunluğu yapılan diğer çalışmalar ile de kanıtlanmıştır. Mei ve ark. (2009) mikro yapıda gözenek ve çatlak oluşumunu önlemeye ve mekanik özellikleri belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Erime bölgesinde temel malzemeye kıyasla mikro sertlik artışı, iç yapıdaki ince taneler ile ilişkilendirilmiştir (Mei ve ark. 2009). Ning ve ark. (2019) kaynaklı bağlantının zayıf mukavemetini önlemek için ısı girdisine bağlı olarak deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Çekme test numunelerinin kırılma yüzeylerinin fraktografisi gevreklik ve süneklik açısından değerlendirilmiştir. Gözeneklerin varlığı ile mekanik özelliklerin düştüğü, kırılmaların erime bölgesi sınırında gerilme konsantrasyonunun bir sonucu olarak meydana geldiği tespit edilmiştir (Ning ve ark. 2019).

Yüce ve ark. (2019) galvanizli yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımlı levhaların lazer kaynak sıfır boşluklu bindirme bağlantısı üzerinde çalışmışlardır. Mikro yapı ve mekanik özellikler ısı girdi seviyelerine göre değerlendirilmiştir. Kaynak dikişi geometrisi, mikro yapı ve intermetalik fazlar enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Kaynak dikişi geometrisi ile intermetalik faz oluşumu arasında bir korelasyon olduğu ortaya

konulmuş. Yüksek ısı girdisinde penetrasyon derinliğinin arttığı ve kaynak dikişi ara yüzeyinde kalın intermetalik tabaka varlığı gözlenmektedir. İntermetalik tabaka, çekme mukavemetini düşürmekte ve kaynak dikişinin ara yüzeyinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır (Yuce ve ark. 2019). Isı girdisinin çok yüksek olması durumunda kaynak morfolojisinde alttan kesme, sıçrama ve çarpmalar gözlemlenmektedir (S. Zhang ve ark. 2020). Farklı konfigürasyonlarda alüminyum alaşımları (5082/6061) lazerle bindirme kaynağı üzerine çalışmalar da bulunmaktadır: üst ve alt plakaların konumu değiştirildiğinde kaynak morfolojisinin farklı olduğu tespit edilmiştir. Mikro yapılar SEM ile gözlemlenmiş, kaynak alanı sıcaklığı simüle edilmiş, çatlak durumunun çekme mukavemetine etkisi incelenmiştir (Lin Chen ve ark. 2020).

## **2.5. Lazer Kaynak Parametreleri**

Lazer kaynak işleminde kaynak kalitesini etkileyen parametreler: lazer gücü, ilerleme hızı, lazer ışın açısı, odak mesafesi, koruyucu gazdır. Lazer modunun darbeleri ya da sürekli olması, dalga boyu gibi lazer ışını ile ilgili özellikler; malzeme türü, malzeme kalınlığı, yüzey özelliklerinin de kaynak işleminde etkinliği bulunmaktadır. İstenilen kaynak kalitesine ulaşabilmek ve kaynak hatalarının önlenmesi için uygun proses parametrelerinin kullanılması gerekmektedir.

Proses parametrelerinin lazer kaynak işlemine etkisinin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Lakshminarayana ve ark. (2018) 1,6 mm kalınlığa sahip DP600 çelik sacların fiber lazer kaynağında lazer gücü, ilerleme hızı ve bu parametrelerin ısı girdisinin mikro yapı, mikro sertlik, mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Lazer gücü için 1,5 kW ve 3 kW, ilerleme hızı için 2 m/dk, 4 m/dk ve 6 m/dk parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Düşük lazer gücünde kaynak penetrasyonu gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Lazer gücü sabit olup ilerleme hızı arttırıldığında kaynak bölgesi ve ITAB genişliğinin azaldığı, ısı girdisi artışı ile kaynak genişliği ve ITAB genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Kaynak bölgesinde hızlı katılma ile oluşan martenzitik yapılar nedeniyle mikro sertlik temel malzemedan daha yüksektir (Lakshminarayana ve ark. 2018).

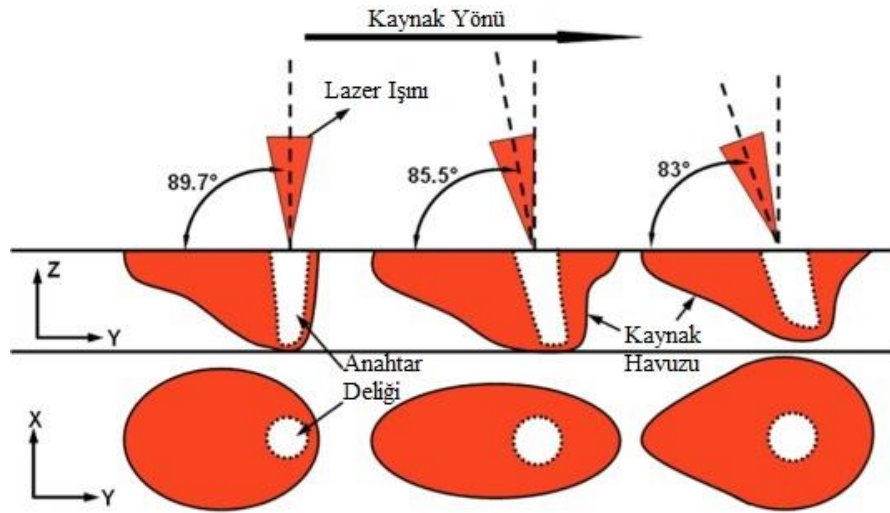
Cao ve Jahazi (2009) farklı kalınlıktaki (1mm ve 2 mm) Ti-6Al-4V alaşımlı levhaların Nd: YAG lazer kaynağında sabit lazer gücünde (4 kW), ilerleme hızı (3 mm/dk, 4,5 mm/dk, 6 mm/dk, 7.5 mm/dk, 9 mm/dk) değişiminin yüzey morfolojisi, kaynak kusurları, mikro yapı, mikro sertlik ve çekme mukavemeti üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaynak hızı arttıkça penetrasyon derinliği, erime bölgesi alanı ve erime bölgesi genişliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Erime bölgesinde martenzit yapı gözlenirken, erime bölgesinden uzaklaştıkça düşük soğuma hızı nedeniyle ferrit oluşumları artmaktadır. Erime bölgesi mikro sertliği martenzit dolayısıyla temel malzemeye kıyasla %20 daha fazladır. Çatlak oluşumlarının ITAB bölgesinden başladığı, mikro gözeneklerin ve alüminyum oksit inklüzyonlarının sünekliliği azalttığı tespit edilmiştir (Cao ve Jahazi 2009).

Huang ve ark. (2018) tarafından lazer gücü, kaynak hızı, odak mesafesi ve gaz akış hızı işlem parametrelerinin kaynak sonrası distorsiyona etkileri araştırılmıştır. Otomotiv parçalarında herhangi bir eğrilik, montaj işleminde problem yaratmaktadır. 1 mm kalınlığındaki AA5052 alüminyum plakalarda kaynak sonrası eğrilik dijital görüntü işleme tekniği ile belirlenmiştir. Lazer gücü arttıkça distorsiyonun arttığı; kaynak hızı, odak mesafesi ve gaz akış hızı artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Distorsiyon miktarı kaynak dikiş genişliği ile ilişkilendirilmiştir, geniş kaynak geometrilerinde yüksek eğrilik oluşmaktadır. Minimum distorsiyon 900 W lazer gücü, 9 mm/sn kaynak hızı, 2 mm odak mesafesi ve 25 l/dk gaz akış hızında elde edilmiştir (Huang ve ark. 2018).

Manonmani ve ark. (2007) 2,5 mm kalınlığındaki ostenitik 304 paslanmaz çeliklerin fiber lazer alın kaynağında lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı değişimine göre kaynak geometrisini incelemişlerdir. Parametreler için 5 seviye belirlenerek deneyler gerçekleştirilmiş, kaynak geometrisini tahmin eden matematiksel model oluşturulmuştur. Kaynak hızı ve lazer açısının artışı ile penetrasyon derinliği ve kaynak genişliği azalmakta; lazer gücü artışı ile artmaktadır (Manonmani ve ark. 2007).

AISI 304 paslanmaz çelik saclar, robotik kontrollü 600 W darbeli Nd:YAG lazer sistemi kullanılarak alın kaynak konfigürasyonunda birleştirilmiştir. Lazer gücü, ilerleme hızı, lazer ışını geliş açısı parametrelerinin kaynak havuzu geometrisi, mikro yapı ve çekme

özelliği üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Parametrelerin ikinci dereceden polinom denklemi geliştirilmiş ve çekme mukavemeti tahmin edilebilmektedir. Lazer ışını geliş açısının ( $89,7^\circ$ ,  $85,5^\circ$ ,  $83^\circ$ ) kaynak havuzu geometrisinde önemli ölçüde değişiklik yarattığı tespit edilmiştir (Şekil 2.4).  $85,5^\circ$  lazer açısı ince sütunlu dendritik iç yapı oluşumuna neden olmuştur ve kaynak havuzu eliptik şekle sahiptir, en yüksek mikro sertlik bu numunede elde edilmiştir.  $89,7^\circ$  ve  $83^\circ$  lazer açılı numunelerde kaba sütunlu dendritik yapılar gözlemlenmiştir. Proses parametreleri için yapılan ANOVA analizinde lazer gücünün, performansı etkileyen en etkin faktör olduğu belirlenmiştir (Kumar ve ark. 2017).



**Şekil 2.4.** Lazer ışını geliş açısına göre kaynak havuzu değişimi (Kumar ve ark. 2017)

Lazer ışını geliş açısının farklı kalınlıktaki galvanizli çeliklerin bindirme kaynağında kaynak performansı araştırılmıştır. Lazer geliş açısı değişiminin dikiş görünümü, kesit şekli, mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Lazer açısı belirlenen kritik bir değerden küçük olduğunda düzgün bir mikro yapıdadır ve yüksek kesme yüklerine dayanabilmektedir; kritik açıdan büyük olduğunda ise kaynak havuzunda çökme kusurları meydana getirmektedir (Mei ve ark. 2017). Bu nedenle kullanılan malzeme türüne, kalınlığına göre optimum kaynak parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

## 2.6. Çift Fazlı Çelikler

Çift fazlı (Dual Phase (DP)) çelikler, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (High Strength Low Alloy (HSLA)) çeliklerin şekil verme özelliklerinin iyi olmaması nedeniyle geliştirilmiştir. Çift faz ifadesi, ferrit ve martenzit fazlarını birlikte ihtiva etmesi dolayısıyla kullanılmaktadır. Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramında, ferritin A<sub>1</sub> – A<sub>3</sub> sıcaklık aralığında östenit bölgesinde herhangi bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bir süre tutularak martenzite dönüşebileceği hızda soğutulmasıyla üretilmektedir. Yumuşak özelliğe sahip ferrit ve yüksek sertliğe sahip martenzit adacıklar şeklinde heterojen bir mikro yapıya sahiptir. Yumuşak ferrit matriste, sert martenzit parçacıkların rastgele dağılımından dolayı, oluşan gerilmeler tüm noktalarda aynı değildir. Ferrit, martenzitten daha fazla deformasyona uğramaktadır; martenzit deformasyonu ise çok azdır yüksek gerilmelere dayanabilmektedir. Ferrit süneklik, martenzit ise yüksek mukavemet özelliği sağlamaktadır. Martenzit hacim oranı %15-20 arasındadır (Fonstein 2016).

Yüksek mukavemet ve yüksek sünekliğin bir arada olması otomotiv sektöründe tercih edilen bir çelik olmasını sağlamıştır. DP çelikleri üretildiği ilk zamanlarda 600-700 MPa çekme mukavemetine sahip iken, şu anda otomotiv üreticilerinin gereksinimleri doğrultusunda 1200 MPa'a kadar çekme mukavemetine sahiptir. Farklı DP çelikleri ile yapılmış olan literatürdeki çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

DP980 malzemenin fiber lazer kaynağında şekillendirilebilirlik ve deformasyon oranını hesaplamak için Erichsen kap testi ve çekme testi uygulanmıştır. SEM ve TEM mikroskoplarında iç yapı incelemeleri yapılmıştır. Şekillendirme testlerinde lokal boyunlanmadan sonra sünek kırılma gerçekleşmiştir. ITAB bölgesinde martenzit temperlenmesi ve karbür oluşumu ile birlikte sertlik düşüşünün meydana geldiği yumuşak bölgenin varlığı tespit edilmiştir. Gerilme durumu sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmiştir (Bandyopadhyay ve ark. 2016a).

Fiber lazer kaynaklı DP780 ve DP980 bağlantıların mikro yapı ve çekme deformasyon davranışı incelenmiştir. Malzemelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri ile çekme özellikleri, deformasyon ve kırılma davranışı analiz edilmiştir. Kaynak bölgesi mikro

yapısı erime bölgesi, kritik üstü ITAB, kritik arası ITAB, kritik altı ITAB ve temel malzeme olarak bölümlere ayrılmıştır. Erime bölgesinde sertlik daha fazla iken temperlenmiş martenzit yapısı nedeniyle kritik altı ITAB bölgesinde sertlik düşüşü meydana gelmektedir. Bu bölgede gerilme artmakta ve çekme testleri sırasında kırılma gerçekleşmektedir (Y. Liu ve ark. 2018a).

DP780 ve DP980 çelikleri kaynaklı bağlantıların mikro yapı ve mekanik özellikleri (kuvvet, yorulma ve şekillendirilebilirlik) incelenmiştir. Erime bölgesi ve ITAB mikro yapı oluşumları detaylandırılmıştır; kaba taneli martenzit, ince taneli martenzit, temperlenmiş martenzit, ferrit yapıları gözlemlenmiştir. Farklı iki metalin kaynak (dissimilar) şekillendirilebilirliği, aynı metallere (similar) kıyasla daha düşüktür (Di ve ark. 2017). DP600, DP980, DP1000 çelikleri için benzer sonuçların elde edildiği çalışmalar da bulunmaktadır (Alves ve ark. 2018, Jia ve ark. 2016, Xu ve ark. 2012).

Çift fazlı çelikler ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin fiber lazer kaynağı mikro yapı, nano sertlik ve çekme özellikleri açısından karakterize edilmiştir (Parkes ve ark. 2014b, Saha ve ark. 2014a). Çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir: iki çelik arasındaki alaşım elementleri farklılığından dolayı, kaynak alanının DP ve HSLA bölgelerinde farklı mikro yapılar oluşmaktadır. DP tarafı erime bölgesi tamamen martenzitik yapıdan oluşmaktadır, temel malzemeye doğru temperlenmiş martenzit içermektedir. TEM mikroskobu ile mikro yapı incelenerek martenzit ve beynit oluşumları tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonrasında kırılma morfolojileri belirlenmiştir, kırılma ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir.

## **2.7. Deney Tasarımı ve Optimizasyon Yöntemleri**

Deney tasarımı yöntemlerinde amaç, bağımsız değişkenler olarak adlandırılan girdi parametrelerinin, bağımlı değişkenler yani çıktılar üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik neden sonuç ilişkisi oluşturmaktır. Deney tasarımı, parametrelerin farklı değerlerinin kombinasyonunu içermektedir; araştırılacak parametrelerin seviye aralıkları belirlenmelidir. Deneyler gerçekleştirildikten sonra istatistiksel yöntemler ile analiz edilerek bağımsız değişkenler ile çıktılar arası etkileşim ortaya konulmaktadır. Faktöriyel, Taguchi, Yanıt Yüzey Metodolojisi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Klasik deney tasarımı yöntemi olan faktöriyel deney tasarımında her seferinde bir parametre değiştirilerek bağımsız parametreler sabit tutulur ve değiştirilen parametrenin sisteme etkisi araştırılır. Yalnızca bir faktörün yanıt üzerindeki etkisi belirlenebilmektedir. Farklı parametre alternatiflerinin deney seviyelerinin tüm kombinasyonlarını içermektedir. Seviye sayısının üstü parametre sayısına göre hesaplanarak deney sayısı belirlenmektedir. Parametre ve seviye sayısı fazla olduğunda yapılacak deney sayısı fazla olduğundan zaman ve maliyet açısından uygun değildir.

Taguchi deney tasarımı yöntemi, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasında optimum kombinasyonu belirlemek için oldukça yararlı bir yöntemdir. Çok sayıda deneysel durumu açıklayabilmek için ortogonal diziler oluşturulmuştur. Ortogonal diziler birçok faktörün en az sayıda deney ile test edilmesine olanak sağlamaktadır. Parametre ve seviye sayısına göre ortogonal dizi seçimi yapılarak deney sayısı belirlenmektedir. Taguchi deney tasarımında, faktörlerin çıktılar üzerindeki etkisini değerlendirmek için Sinyal-Gürültü oranı (Signal/Noise Ratio) kullanılmaktadır: çıktıların ortalamasının varyansı ile hesaplanmaktadır.

Yanıt Yüzey Metodolojisi (Response Surface Method (RSM)), süreçleri iyileştirmek ve optimize etmek için kullanılan istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir. Birçok bağımsız girdi değişkeninin, işlem performansını etkilediği durumlarda uygulanmaktadır; performans ölçüsü ise yanıt değişkenidir. Bağımsız değişkenler  $x$  ile ifade edilmektedir, deneysel sonuçlarda her  $x$  değerine karşılık gelen bir yanıt verim değeri bulunmaktadır. Yanıt verim değerleri yüzey olarak şematize edilmektedir, yöntem ismini de bu grafikten almıştır. Aynı verim değerlerine sahip noktalar birleştirilerek kontür çizgileri ile kontür grafikleri de elde edilmektedir.

Yanıt yüzeyi metodolojisinde, bağımsız değişkenlerin  $(x_1, x_2, \dots)$  uzayını keşfetmek için deneysel strateji kullanılır; yanıt verimi ile süreç değişkenleri arasındaki ilişki belirlenir. Bağımsız değişkenlerin fonksiyonu Denklem 2.1'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2.1)$$

Bağımsız değişkenlerin sayısına göre yanıt verimi birinci ya da ikinci derece polinom olarak ifade edilebilmektedir. Bağımsız iki değişken olması durumunda, birinci derece polinom modeli Denklem 2.2'deki gibidir.

$$\eta = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 \quad (2.2)$$

Bağımsız değişkenlerin ikiden fazla olduğu durumda birinci derece polinom yetersiz kalmakta, ikinci derece polinom ile matematiksel model oluşturulmalıdır (Denklem 2.3).

$$\eta = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 \quad (2.3)$$

İkiden büyük mertebedeki polinomlar için genel ifade Denklem 2.4'deki gibidir. Yanıt fonksiyonu polinom yaklaşımı Taylor seri açılımına dayanmaktadır.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_jx_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj}x_j^2 + \sum_{i<j}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij}x_i x_j \quad (2.4)$$

Burada  $\beta$  bilinmeyen parametredir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerden, bilinmeyen  $\beta$  değerleri tahmin edilerek polinom denklemi elde edilmeye çalışılır (Myers ve ark. 2008).

Yanıt Yüzey Metodolojisi yönteminde Box-Behnken ve Merkezi Kompozit Tasarımı (Central Composite Design) olmak üzere iki adet deney tasarımı bulunmaktadır; faktörlerin seviye sayısına göre deney tasarımı belirlenmektedir. Seviye sayısı 3 olduğunda Box Behnken deney tasarımı; seviye sayısı daha fazla olduğunda Merkezi Kompozit Tasarımı kullanılmaktadır. Deney sayısı merkez nokta, faktöriyel nokta ve eksenel noktaların toplamıdır.

Literatürdeki proses parametrelerine yönelik optimizasyon çalışmaları ve kullanılan yöntemler incelenmiştir. DP780 çeliğinin Al5052 bindirme lazer kaynak bağlantısında kaynak genişliği ve kesme kuvvetini optimize etmek için araştırma yapılmıştır. Kontrol



parametreleri ve yanıtlar arasında matematiksel ilişki geliştirmek için Yanıt Yüzeyi Metodolojisi Merkezi Kompozit Tasarım modeli kullanılmıştır. Modelin yeterliliğini kontrol etmek için doğrulama deneyleri yapılmış; tahmin edilen değerler ile gerçek değerler birbiri ile tutarlıdır. ANOVA analizi ile etkin parametreler belirlenmiştir: lazer gücü ve kaynak hızı parametrelerinin kesme kuvveti üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir (Guiqian Liu ve ark. 2020a).

Reisgen ve ark. (2017) Yanıt Yüzey Metodolojisi Box Behnken deney tasarımını kullanarak DP600 ve TRIP 700 çelik sacların kaynak dikiş profilini incelemiştir. Lazer gücü, ilerleme hızı, odak mesafesinin kaynak dikiş profiline etkileri ortaya konularak parametre optimizasyonu yapılmıştır. Yanıt Yüzey metodolojisinin güçlü bir optimizasyon yöntemi olduğu, optimum koşulların tespit edilebileceği ortaya konulmuştur (Reisgen ve ark. 2012).

Zhang ve Cong (2017) östenitik ve martenzitik çeliklerin lazer kaynağında Yanıt Yüzey Metodolojisi Box Behnken deney tasarımı ile süreç optimizasyonu gerçekleştirmiştir; kaynak derinliği ve maksimum sıcaklık değerinin matematiksel modelleri çok değişkenli regresyon analizi yapılarak elde edilmiştir. Optimum kaynak işlemi için parametre grubu değerleri belirlenmiştir (W. W. Zhang ve Cong 2017).

Yüce ve ark. (2016) Taguchi yaklaşımını kullanarak fiber lazer kaynaklı yüksek mukavemetli düşük alaşımlı ve martenzitik çeliğin proses parametreleri optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Lazer gücü, kaynak hızı ve odak mesafesi değişkenlerinin, bağlantıların mekanik ve mikro yapısal özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Maksimum çekme yükü ve minimum ısı girdisi için optimum parametreler tahmin edilmiş, parametrelerin önem derecesi ANOVA analizi ile belirlenmiştir (Yuce ve ark. 2016).

Yang ve ark. (2015) AA6061-T6 alüminyum alaşımlı ve 316L paslanmaz çelik levhaların lazer kaynağında proses parametre optimizasyonu için Taguchi ve Yanıt Yüzey Metodolojisi yöntemlerini karşılaştırmıştır. Kaynak parametrelerinin önemini belirlemek için ANOVA varyans analizi kullanılmıştır. Kaynak dikiş boyutlarını tahmin etmek için ikinci dereceden bir denklem geliştirilmiştir; geçerliliğini kanıtlamak için

optimum parametreler ile doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynağında performans artırmak ve parametreleri optimize etmek için Taguchi ve Yanıt Yüzey Metodolojisi yöntemlerinin uygulanabilirliği kanıtlanmıştır (Yang ve ark. 2015). Taguchi ve Yanıt Yüzey metodolojisi yöntemlerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği başka bir çalışma Long ve ark. (2018) tarafından yapılmıştır. DC04 çeliğin 6016 alüminyum alaşımlarına kaynak edilebilirliği kırılğan intermetalik faz oluşumu nedeniyle zordur. Lazer kaynak işlemi için yeni bir yaklaşım önerilmiştir: kaynak işlemi öncesinde plakalar arasına metal tozları yerleştirilmiştir. Metal tozları, çelik-alüminyum kaynağını güçlendirerek çekme özelliklerini artırmıştır. Kaynak parametreleri optimize edilerek intermetalik bileşiklerin oluşumu kontrol altına alınmış, istenilen mekanik özelliklere sahip kaynak bağlantısı elde edilmiştir. Taguchi ve Yanıt Yüzey Metodolojisi yöntemlerinin her ikisi de uygundur (Long ve ark. 2018).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, lazer kaynak uygulamasında kullanılan malzeme ve yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir; üretimin gerçekleştirildiği cihaz bilgileri, deney parametreleri ve optimizasyon yöntemi, metalografik incelemeler, mikrosertlik ölçümleri, çekme testleri, SEM ve Simufact analizleri alt bölümler şeklinde incelenmiştir.

#### 3.1. Materyal

Çalışmada, DP1200 çift fazlı çelik malzeme kullanılmıştır: 900-1100 MPa akma mukavemeti, 1180-1350 MPa çekme mukavemeti ve minimum %6 uzama mekanik özelliklerine sahiptir. DP1200 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** DP1200 malzemenin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Material	C	Si	Mn	Al	P	S	Cr+Mo	Nb+Ti
DP1200	0,23	1	2,9	0,15-1	0,05	0,01	1	0,15

#### 3.2. Yöntem

##### 3.2.1. Lazer Kaynak Cihazı

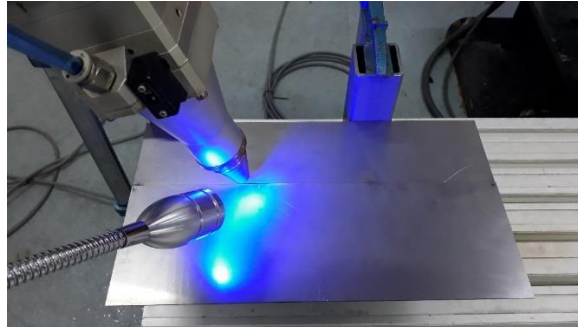
Kaynak işlemleri, fiber lazer teknolojisi ile üretilen CW (Continuous Wave) lazer ışını yardımıyla gerçekleştirilmiştir: dalga boyu 1070 nm, lazer ışın çapı 100 µm, maksimum lazer gücü 6 kW'dır. Proses fiberi 0,2 mm, kolimatör lensi 100 mm, odak lensi 200 mm'dir. Odaklanmış lazerin spot çapı 0,4 mm, odak mesafesi 190 mm'dir.

Entegre robot sistemleri ve fiber optik kablo bağlantıları ile lazer ışın hareketi sağlanarak kaynak işlemleri gerçekleştirilmektedir: 6 eksenli KUKA robot döner tabla üzerinde hareket etmektedir, servo motor kontrolü CNC kontrol ünitesi ve yazılımı ile sağlanmaktadır (Şekil 3.1). CCD kamera yardımıyla konumlanacak pilot lazer ışını kontrol ekranına yansıtılarak izlenebilmektedir. Lazer ışını görülebilirliğini ve takibini kolaylaştırmak için mavi renkli ışık kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Kaynak noktasında

koruyucu gaz için nozul çıkışı bulunmaktadır: Argon gaz sıcaklığı 5-25 °C, akış hızı 12 lt/dk'dır. Lazer kaynak işlemi IEC60822 lazer güvenlik protokolüne uygun aktif lazer güvenlik pencereleri ve sürgülü kapıların bulunduğu bir odada gerçekleştirilmiştir; kaynak işlemine özel gözlük kullanılmıştır.



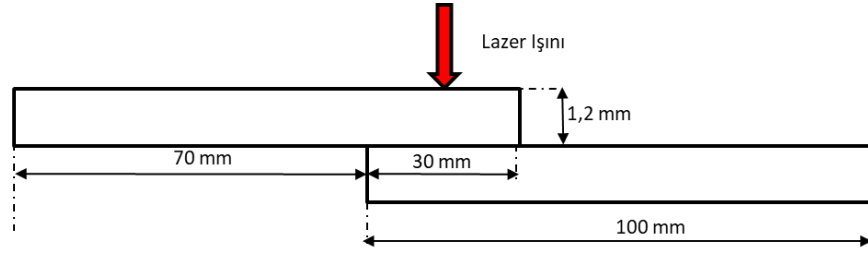
**Şekil 3.1.** Lazer kaynak cihazı ve termal kamera ekipmanları



**Şekil 3.2.** Lazer kafası ve pilot lazer ışını

### 3.2.2. DeneY Tasarımı ve Lazer Kaynak Uygulaması

Gerçekleştirilen çalışma sırasında ilave bir dolgu teli kullanılmamıştır. Fiber lazer teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işlemi, bindirme kaynağı şeklinde uygulanmıştır. 300 mm x 100 mm boyutunda ve 1,2 mm kalınlığındaki DP1200 çelik plakalar üst üste gelecek şekilde konumlandırılarak bindirme uzunluğunun tam ortasına lazer ışını gelecek şekilde lazer kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Kaynak işlemi esnasında plakaların sabitlenmesi ve ara yüzeylerinde boşluk kalmaması için her kaynak işlemi öncesinde aynı noktalardan olacak şekilde dört noktadan lazer punto kaynak yapılmıştır (Şekil 3.4). Kaynak işlemleri esnasında herhangi bir fikstür ya da aparat kullanılmamıştır.



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan bindirme kaynağı şematik gösterimi



Şekil 3.4. Lazer kaynak işlemi öncesi uygulanan punto kaynak noktaları

Gerçekleştirilen çalışmada lazer kaynak prosesinde etkin olan lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısı parametreleri seçilmiştir (Çizelge 3.2). Response Surface Method yöntemine göre üç parametre ve beş seviye için deney tasarımı oluşturulmuştur (Guiqian Liu ve ark. 2020b). Deney tasarımı ile 20 adet deney grubu oluşturulmuştur (Çizelge 3.3): 8 adet faktöriyel nokta, 6 adet eksenel nokta, 6 adet merkez nokta. Kaynak esnasındaki ısı girdisi de Çizelge 3.3'te verilmiştir. Isı girdisi, lazer gücü ve ilerleme hızı parametrelerine bağlıdır (Eşitlik 3.1):

$$Isı\ Girdisi\ (J/mm) = \frac{Lazer\ Gücü\ (W)}{İlerleme\ Hızı\ (mm/s)} \quad (3.1)$$

**Çizelge 3.2.** Lazer kaynak proses parametreleri ve belirlenen seviye aralıkları

Parametre	Birim	Seviye				
		1	2	3	4	5
Lazer Gücü	W	2200	2350	2500	2650	2800
İlerleme Hızı	mm/s	40	47,5	55	62,5	70
Lazer açısı	°	70	75	80	85	90

**Çizelge 3.3.** Response Surface Method yöntemine göre oluşturulan deney tasarımı

Deney No	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Lazer Açısı (°)	Isı Girdisi (J/mm)
1	2350	47,5	75	49,47
2	2650	47,5	75	55,79
3	2350	62,5	75	37,60
4	2650	62,5	75	42,40
5	2350	47,5	85	49,47
6	2650	47,5	85	55,79
7	2350	62,5	85	37,60
8	2650	62,5	85	42,40
9	2200	55	80	40,00
10	2800	55	80	50,91
11	2500	40	80	62,50
12	2500	70	80	35,71
13	2500	55	70	45,45
14	2500	55	90	45,45
15	2500	55	80	45,45
16	2500	55	80	45,45
17	2500	55	80	45,45
18	2500	55	80	45,45
19	2500	55	80	45,45
20	2500	55	80	45,45

Belirlenen proses parametrelerinin uygunluğunu test etmek için maksimum, minimum ve orta düzey ısı girdisine sahip parametreler için ön deneme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.3'te "3", "11", "12" ve "13" nolu deney gruplarına karşılık gelen parametreler için ön denemeler gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.4). Ön denemelerdeki kaynak kaliteleri değerlendirilerek çalışmada kullanılacak parametre seviyelerinin uygun olup olmadığı belirlenmiştir.

**Çizelge 3.4.** Ön deneme çalışmalarında kullanılan parametreler

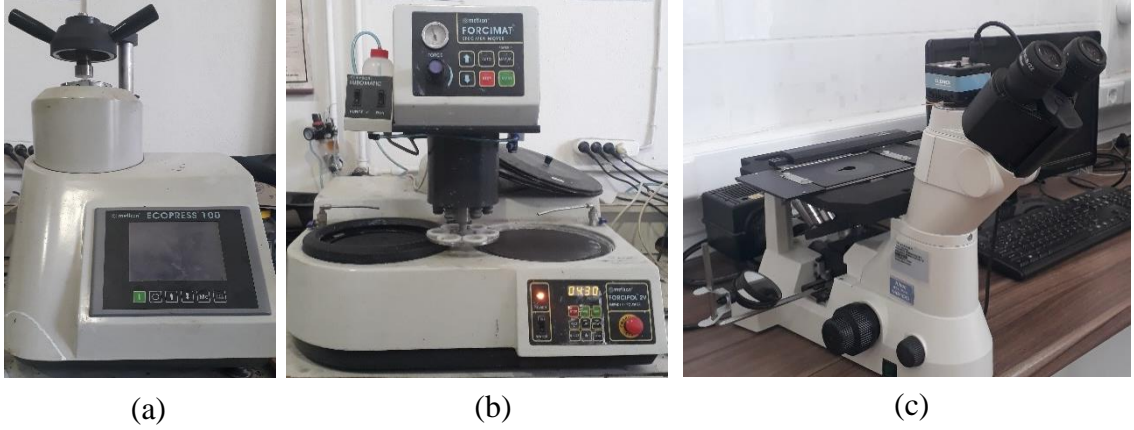
Deneý No	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Lazer Açısı (°)	Isı Girdisi (J/mm)
1	2500	70	80	35,71
2	2350	62,5	75	37,6
3	2500	55	70	45,45
4	2500	40	80	62,5

### 3.2.3. Metalografik İnceleme

Lazer kaynak uygulaması gerçekleştirildikten sonra metalografik incelemelerde ve çekme deneyinde kullanılmak üzere kaynaklanmış plakalardan lazer kesim yöntemiyle numuneler elde edilmiştir. Metalografik incelemeler için lazer kesim ile elde edilen numuneler STRUERS Labotom-3 marka metalografik kesme cihazı ile kaynak enine kesiti yönünde kesilmiştir ve elde edilen bu numuneler Metkon ECOPRESS 100 marka numune kalıplama cihazı bakalite alınmıştır. Bakalite alınmış numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerde Metkon FORCIPOL 2V cihazı kullanılmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 180, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 gritlik SiC su zımparası kullanılmıştır. Parlatma işlemleri de sırasıyla 1 mikron ve 0,3 mikron Alümina ( $Al_2O_3$ ) solüsyonları ile gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapının incelenebilmesi için yapılan dağlama işleminde %3 Nital (97 g Ethanol ( $C_2H_5OH$ ) ve 3 g Nitrik asit ( $HNO_3$ )) kullanılmıştır. Dağlayıcı, parlatılmış yüzeye pamuk yardımıyla 5-10 s uygulandıktan sonra su ile yıkanmıştır. Dađlama işlemiyle iç yapısı ortaya çıkarılan numunelerin NIKON ECLIPSE MA100 ters metal mikroskobu ve CLEMEX görüntü analiz programı yardımıyla çeşitli büyütmelerde görüntüleri alınmıştır. Metalografik incelemelerde kullanılan numune kalıplama cihazı, zımparalama-parlatma cihazı ve optik mikroskop fotoğrafları Şekil 3.5'de gösterilmektedir.





**Şekil 3.5.** (a) Metkon Ecopress numune kalıplama cihazı, (b) Metkon Forcipol zımparalama-parlatma cihazı, (c) Nikon Eclipse MA100 ters metal mikroskobu

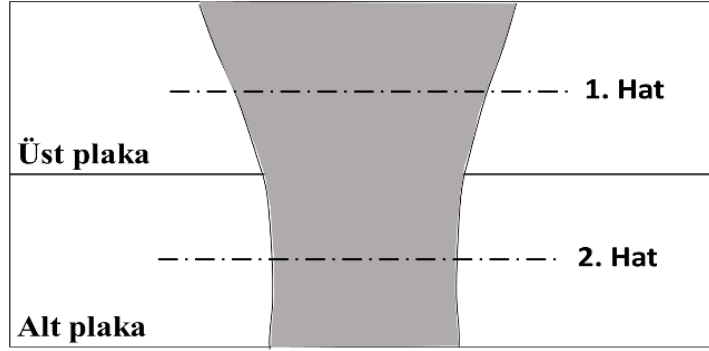
### 3.2.4. Mikrosertlik Ölçümü

Mikro sertlik ölçümleri Vickers yöntemiyle METKON Duroline-M sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.6). Ölçümlerde 50 gram yük 10 saniye süreyle uygulanmıştır. Ölçümler arası mesafe 100 mikron olarak alınmıştır.

“1”, “2” ve “3” nolu deney numuneleri için üst plaka ve alt plakanın ortasından geçen 1. Hat ve 2. Hat boyunca mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.7). “4”, “8”, “13”, “14”, “15” nolu deney numuneleri için sadece üst plakada yer alan 1. Hat boyunca ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Erime Bölgesi (EB), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), Temel Malzeme (TM) bölgelerini kapsayacak şekilde yapılmıştır.



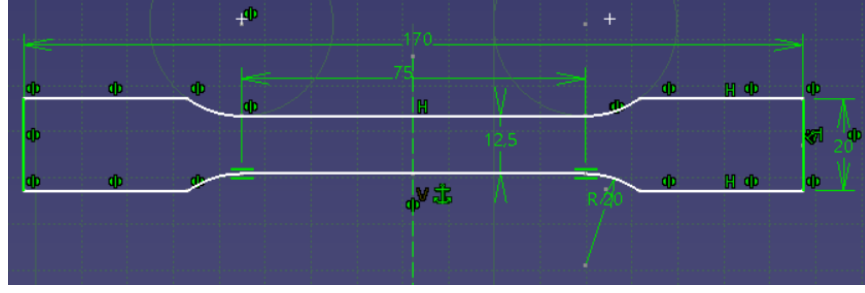
**Şekil 3.6.** Çalışmada kullanılan Metkon Duroline-M sertlik ölçüm cihazı



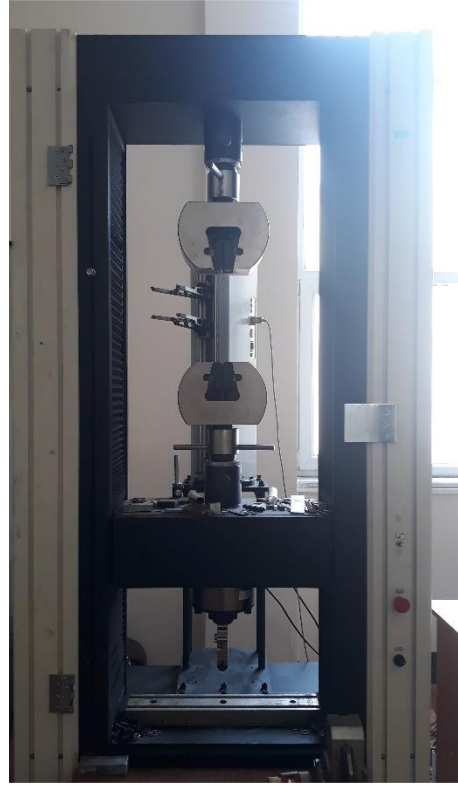
**Şekil 3.7.** Vickers mikro sertlik ölçüm hatları

### 3.2.5. Çekme Testi

100 mm x 270 mm boyutlarındaki kaynaklı plakalardan, kaynak yönü ve çekme yönü birbirine dik olacak şekilde lazer kesim yöntemiyle numuneler elde edilmiştir (Şekil 3.8) (Gui-qian Liu ve ark. 2020). Çekme deneyleri UTEST-7014 marka universal çekme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, Celtron marka yük hücresi ve MF (Mess-& Feinwerktechnik) marka otomatik ekstansometre ekipmanları ile donatılmıştır (Şekil 3.9). Farklı deney parametrelerine sahip plakalardan çıkarılan üç adet çekme numunesi için deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Deneyde çekme hızı 3 mm/dk olarak kullanılmıştır. Testler sonucunda maksimum kayma kuvvet değeri ve yüzde uzama değerleri elde edilmiştir.



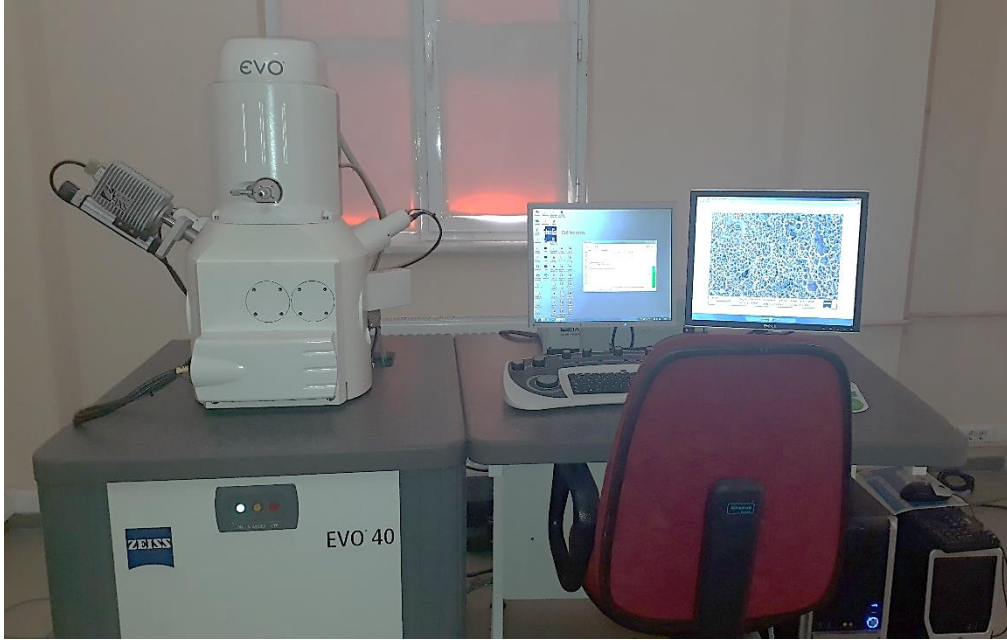
Şekil 3.8. Çekme deneyi numune boyutları



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan UTEST-7014 üniversal çekme test cihazı

### 3.2.6. SEM Analizi

Çekme deneyi sonrasında numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler 20 kV ZEISS EVO®40 XVP tipinde SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Kırılma yüzeyi incelenen numuneler, mikro sertlik ölçümleri için seçilmiş numunelerdir. (“1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14”, “15”).



Şekil 3.10. Çalışmada kullanılan ZEISS EVO®40 XVP taramalı elektron mikroskobu

### 3.2.7. Termal Analiz

Lazer kaynak işlemleri OPTRIS PI450i termal kamera ile kayıt altına alınarak OPTRIS PIX Connect yazılımı yardımıyla gerçek zamanlı termal analizler yapılmıştır. Termal kamera 764x480 piksel çözünürlükte, 80 Hz frekansta, 625-1900 °C sıcaklık aralığında ölçümler yapmaktadır (Şekil 3.11).

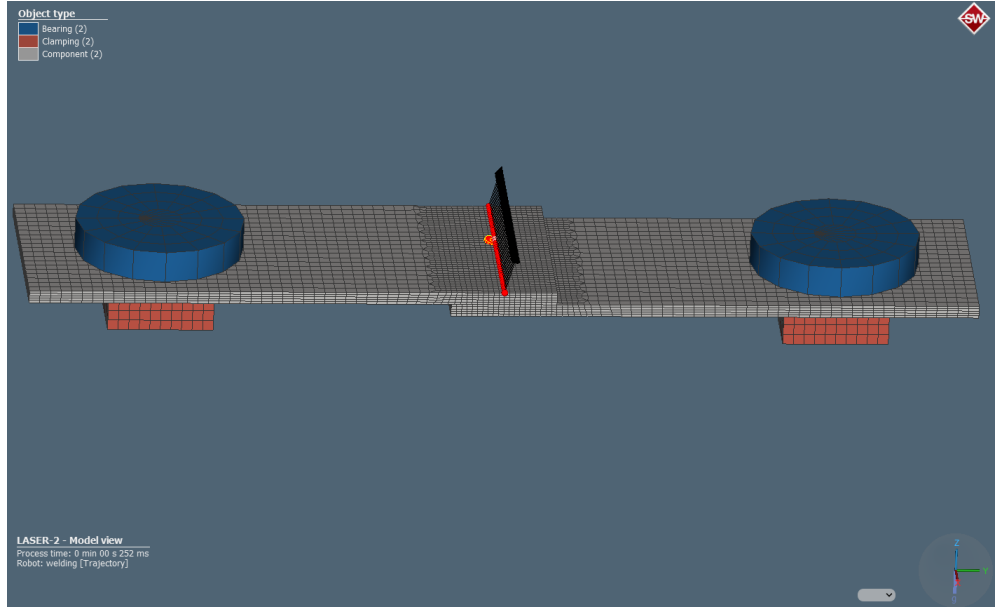


**Şekil 3.11.** Çalışmada kullanılan OPTRIS PI450i termal kamera

### **3.2.8. Simufact Analizi**

Fiber lazer kaynak prosesi Hexagon Simufact Welding 2020 programı yardımıyla simüle edilmiştir. Elde edilen çıktılar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bindirme kaynak bağlantısındaki üst plaka ve alt plaka için mesh yapılmış CAD datalar import edilerek programa aktarılmıştır. DP1200 malzeme bilgileri Simufact Material malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Çelik plakaların yataklanması için iki adet bearing, sabitlenmesi için 2 adet klamp eklenmiştir (Şekil 3.12). Simülasyonda konik ısı kaynağı modeli kullanılmıştır; sabit ısı girisinde lazer ışını enerjisini merkezden malzemenin içine yönlendirmekte ve anahtar deliği etkisini simüle etmektedir. Lazer kaynak işlemi 20 s sürede tamamlanmaktadır.

Isı kaynağı, kaynak parametreleri ve lazer ışını takip yolu tanımlanarak belirlenen deney grupları için (“1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14”, “15” nolu deney grupları) termal ve termomekanik analizler yapılmıştır. Termal analiz ile EB ve ITAB, nüfuziyet bölgeleri belirlenerek sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Termomekanik analiz kapsamında ise distorsiyon miktarı (X, Y, Z doğrultularında ve toplam deplasman), kaynak sonrası gerilme dağılımı (X, Y, Z doğrultularında normal gerilme, eşdeğer gerilme, maksimum asal gerilme), eşdeğer şekil değiştirme (plastik şekil değiştirme ve elastik şekil değiştirme) bilgileri tespit edilmiştir.



Şekil 3.12. Simufact Welding lazer bindirme kaynak bağlantısı

## 4. BULGULAR (BULGULAR ve TARTIŞMA)

### 4.1. Ön Deneme Çalışma Sonuçları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek olan deneylerde kullanılması planlanan parametrelerin uygunluğunun belirlenebilmesi için maksimum, minimum ve orta düzeylerde ısı girdisine sahip dört farklı deney grubu belirlenmiştir (Çizelge 3.4). Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri için farklı seviyelerdeki değerler ile ön deneme çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneme sonrası elde edilen lazer kaynaklı bağlantılar fotoğraflanmıştır (Şekil 4.1). Lazer kaynaklı bağlantılar görsel olarak incelenmiş, birleşme gerçekleşerek tam penetrasyon sağlanmıştır. Kaynak kalitesi açısından bir problem olmadığı tespit edilmiştir; ilgili proses parametrelerinin sınır değerler olarak kullanılabilceğine karar verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Ön deneme çalışması ile elde edilen lazer kaynaklı bağlantılar (“1” numaralı numune ısı girdisi: 35,71 J/mm, “2” numaralı numune ısı girdisi: 37,60 J/mm, “3” numaralı numune ısı girdisi: 45,45 J/mm, “4” numaralı numune ısı girdisi: 62,5 J/mm)

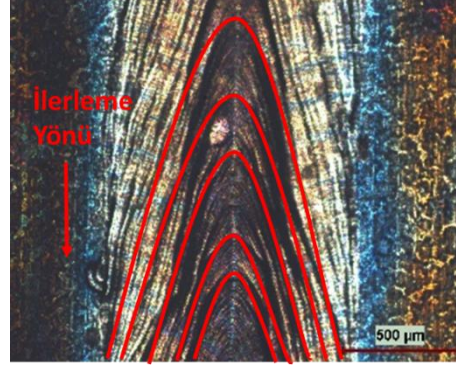
## 4.2. Kaynak Dikiş Yüzeyi İncelemeleri

Lazer kaynaklı parçalar, yüzey gerilimi ve viskozite kaynaklı ergiyik metalin hareketiyle birlikte ilerleme yönüne ters, dışbükey bir görünüme sahiptir (Şekil 4.2). Yüksek lazer gücü ve ısı girdisi sayesinde tam penetrasyon gerçekleşmiştir; ancak bu durum kaynak çevresinde sıçrama (spatter) problemlerine neden olmaktadır. Lazer ışını ile ergiyen metal, geri tepme basıncı (recoil pressure) ve yüzey gerilimi etkisi ile kaynak havuzunun arkasına doğru ilerlemektedir. Lazer gücü yükseldikçe geri tepme basıncı etkisi artmakta ve kaynak havuzu dinamik dengesi bozulmaktadır. Anahtar deliğinde salınım yaratan bu durum, kaynak havuzundaki ergimiş metalin akışını etkilemekte ve damlacıklar halinde dağılarak sıçramasına neden olmaktadır. Sıçramalar, malzeme kaybına yol açmaktadır (S. Zhang ve ark. 2020). Deney numunelerinin ön ve arka yüzey görünüşleri optik mikroskopta 50 büyütme altında alınarak sıçrama etkileri tespit edilmiştir. Kaynak dikişi ön yüzey ve arka yüzey morfolojileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir. Belirgin olarak gözlemlenen sıçrama etkileri lazer kaynaklı numunelerin arka yüzeylerindedir, ön yüzeyde genel olarak kaynak problemi bulunmamaktadır.

Anahtar deliğine verilen ısı girdisi arttığında erimiş metal derine nüfuz etmekte ve tam penetrasyon gerçekleşmektedir. Ergiyik metal, geri tepme basıncı etkisiyle kaynak ilerleme yönünün tersinde, yer çekiminin etkisiyle aşağı yönde hareket etme eğilimindedir. Yüzey gerilimi nedeniyle eriyiğin yukarıya akışı pek mümkün değildir, hareket geriye ve aşağıya doğru gerçekleşmektedir. Alt yüzeyde daha çok sıçrama etkisinin gözlemlenmesi ergimiş metalin geri tepme basıncı, yüzey gerilimi ve yer çekimi nedeniyle akışın aşağı yönde olması ile ilişkilidir. Ergiyik geriye doğru hareket etse de üst yüzeye sıçrayan bir hareket oluşturması daha azdır; aşağı doğru hareket, geriye doğru hareketten daha hızlı gerçekleşmektedir. Ayrıca kaynak havuzunda buharlaşma etkisiyle yoğun bir buhar bulutu meydana gelmektedir; buharlaşma ve buhar bulutunun meydana getirdiği geri tepme basıncı ile eriyik aşağıya doğru hareket etmektedir. Anahtar deliği çıkışının yüzey gerilimi nedeniyle daha dar olmasıyla basınçlı buhar ve erimiş metal kaynak havuzundan damlacıklar şeklinde sıçrama yaratarak çıkış yapmaktadır. Buharlaşmanın buhar basıncı, yerel yüzey geriliminden

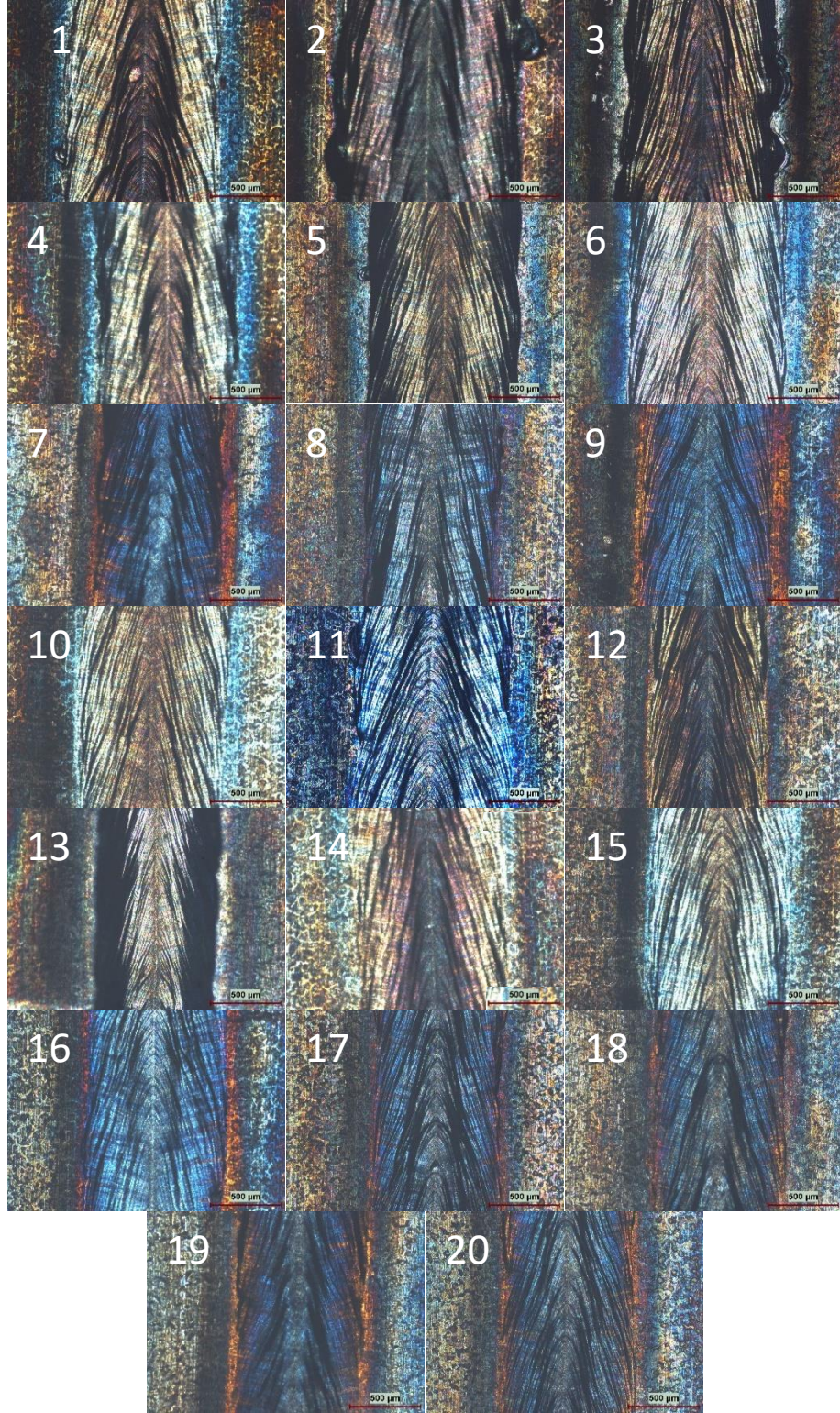


daha büyük olduğundan arka yüzeyden çıkış yapan buhar miktarı, üst yüzeyden çıkış yapan buhar miktarından daha fazladır (M. J. Zhang ve ark. 2013).

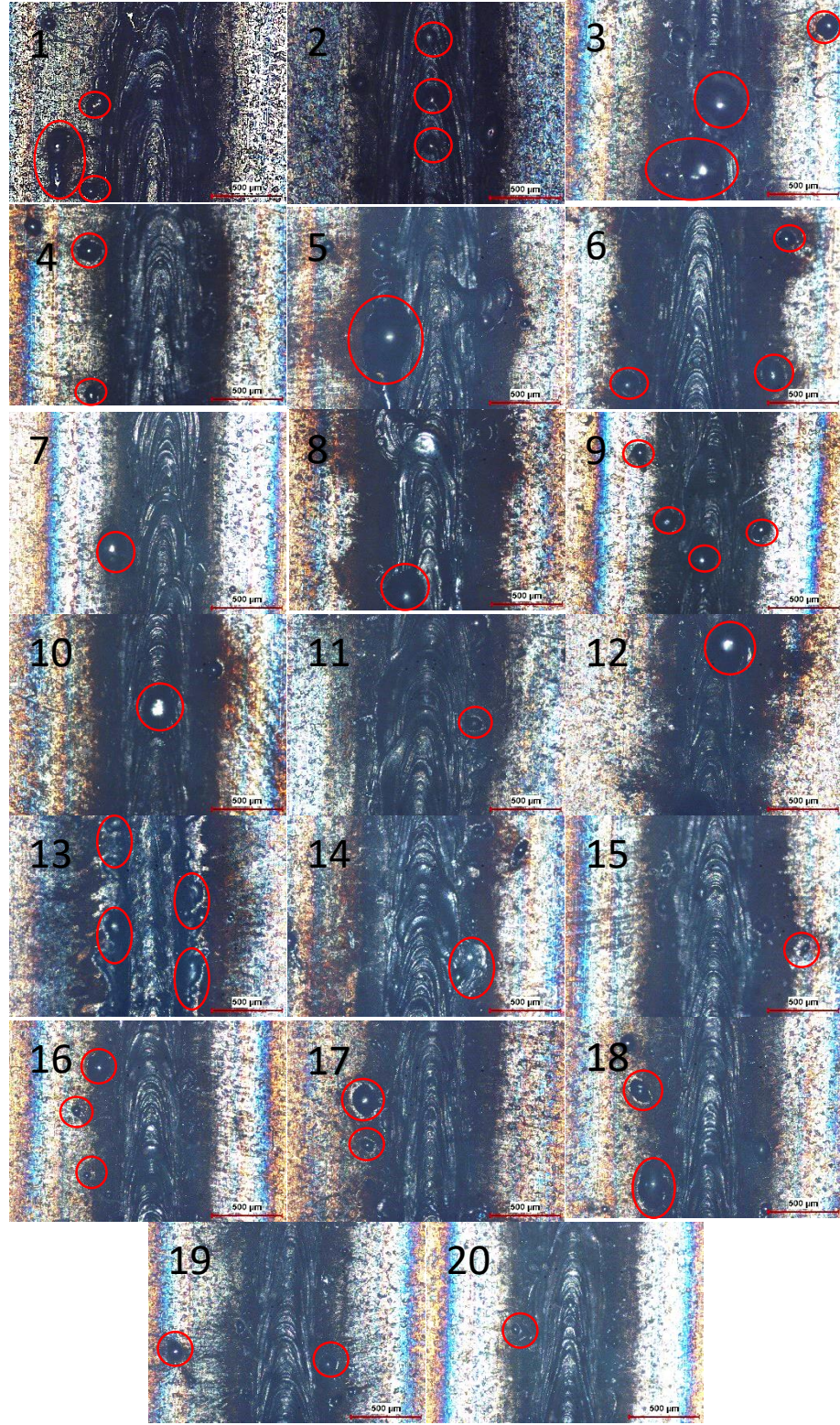


**Şekil 4.2.** Lazer kaynak dikişi ilerleme yönüne ters dışbükey yapı

Lazer kaynak sırasında oluşan kararsız plazma bulutu büyük boyutlu sıçramalara neden olmaktadır; kaynak havuzu kararsız hale gelmekte ve kaynak hatası oluşmaktadır (Z. Chen ve ark. 2014). Kaynak işlemi vakumlu bir ortamda gerçekleştirildiğinde plazma bulutu stabilize olmakta daha az miktar ve boyutta sıçrama göstermektedir; ayrıca temel malzeme yüzeyindeki kir, nem, yağ gibi dış faktörler de kaynak kalitesini etkilemektedir. Fiber lazer kaynak işlemlerin vakumlu bir ortamda yapıldığında daha verimli sonuçlar elde edileceği öngörülmektedir.



**Şekil 4.3.** Numunelerin kaynak dikişi morfolojileri ön yüzey görüntüleri

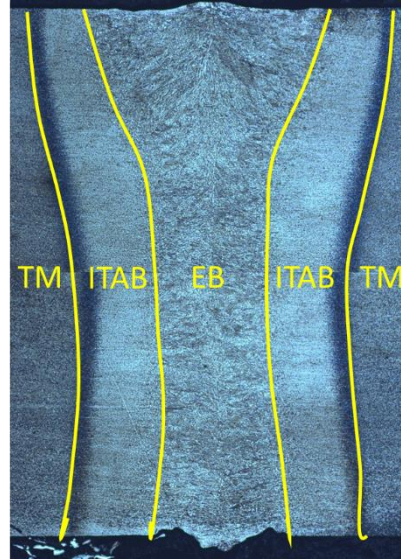


Şekil 4.4. Numunelerin kaynak dikişi morfolojileri arka yüzey görüntüleri

### 4.3. Kaynak Geometrisi İncelemeleri

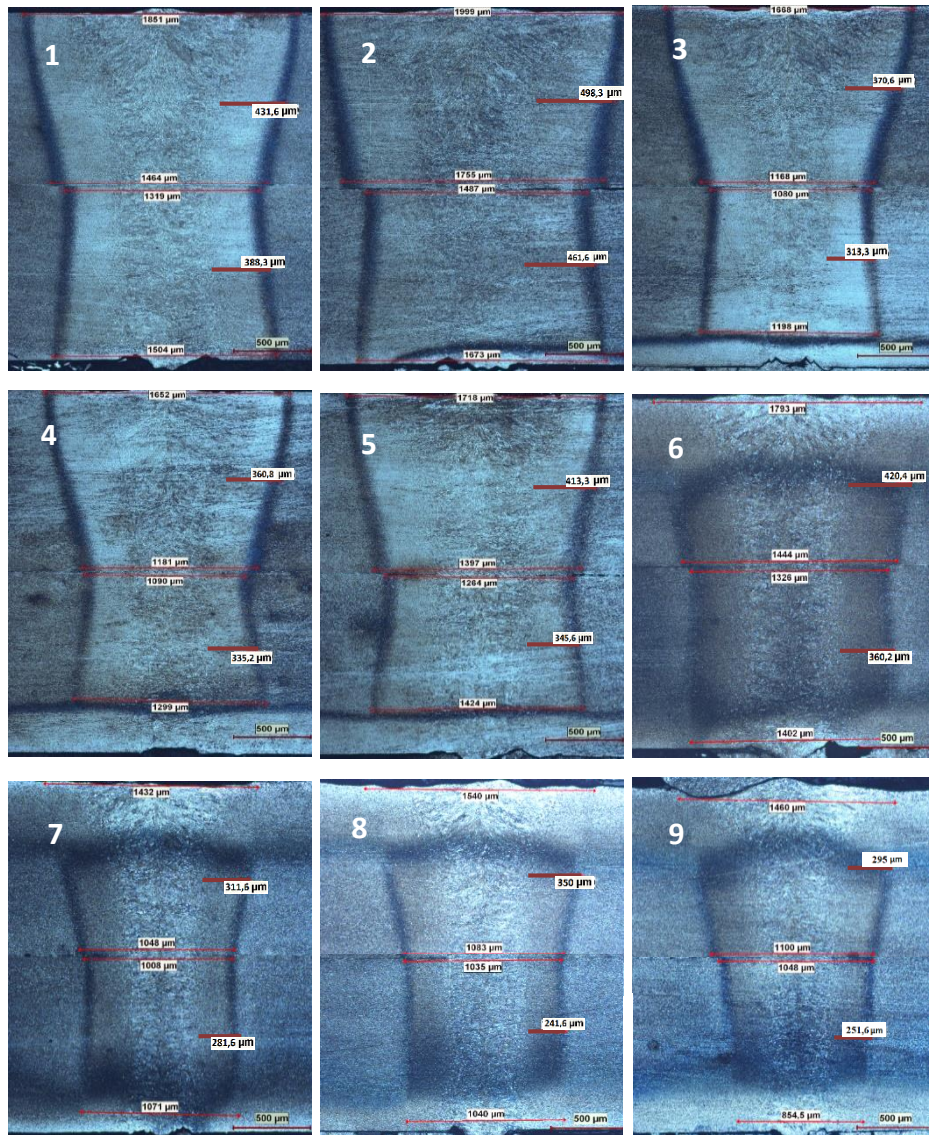
Lazer kaynak sonrası enine kesit alınıp numuneler incelendiğinde tüm numunelerde tam penetrasyon elde edildiği gözlemlenmektedir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6). Isı girdisi yeterli olduğunda kaynak görünümü “kum saati” şeklinde oluşmaktadır; ısı girdisi yetersiz olduğunda ise eksik penetrasyon elde edilmekte birleşme gerçekleşmemektedir, kaynak “koni” şeklini almaktadır.

Kaynak bölgesi mikro yapısı genel olarak erime bölgesi (EB), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve temel malzemeden (TM) oluşmaktadır (Şekil 4.5). Dual Phase (DP) 1200 çeliği temel malzeme ferrit ve martenzit yapısındadır. EB sıcaklığı, çeliğin erime noktasını aşmaktadır; bu bölgenin mikro yapısı çeliğin soğuma esnasında katı hal dönüşümlerine bağlıdır. ITAB, malzemelerin tam olarak erime bölgesi (EB) ile birleştiği ancak yine de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı bir bölgedir, mikro yapısı ise sıcaklığa bağlı olarak faz dönüşümlerine bağlıdır. Bu bölgelerin kaynak geometrileri proses parametreleri ile değişkenlik göstermekte ve farklı geometrik uzunluk değerleri elde edilmektedir. Çalışma kapsamında üretilen kaynaklı numunelerin genel mikro yapıları Şekil 4.6’de gösterilmektedir.

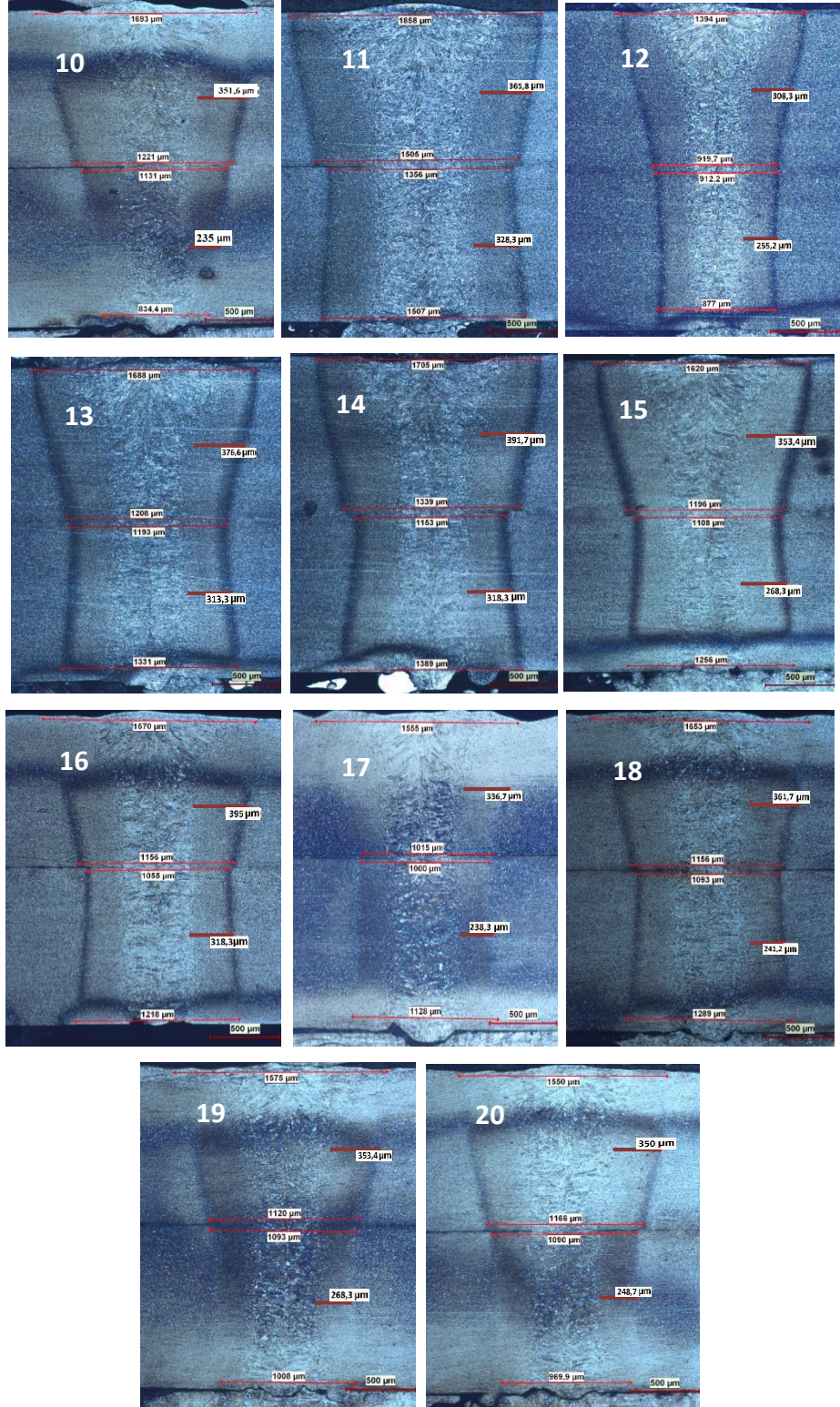


**Şekil 4.5.** Kaynaklı numunede mikro yapı bölgeleri (EB: Erime Bölgesi, ITAB: Isı Tesiri Altındaki Bölge, TM: Temel Malzeme)

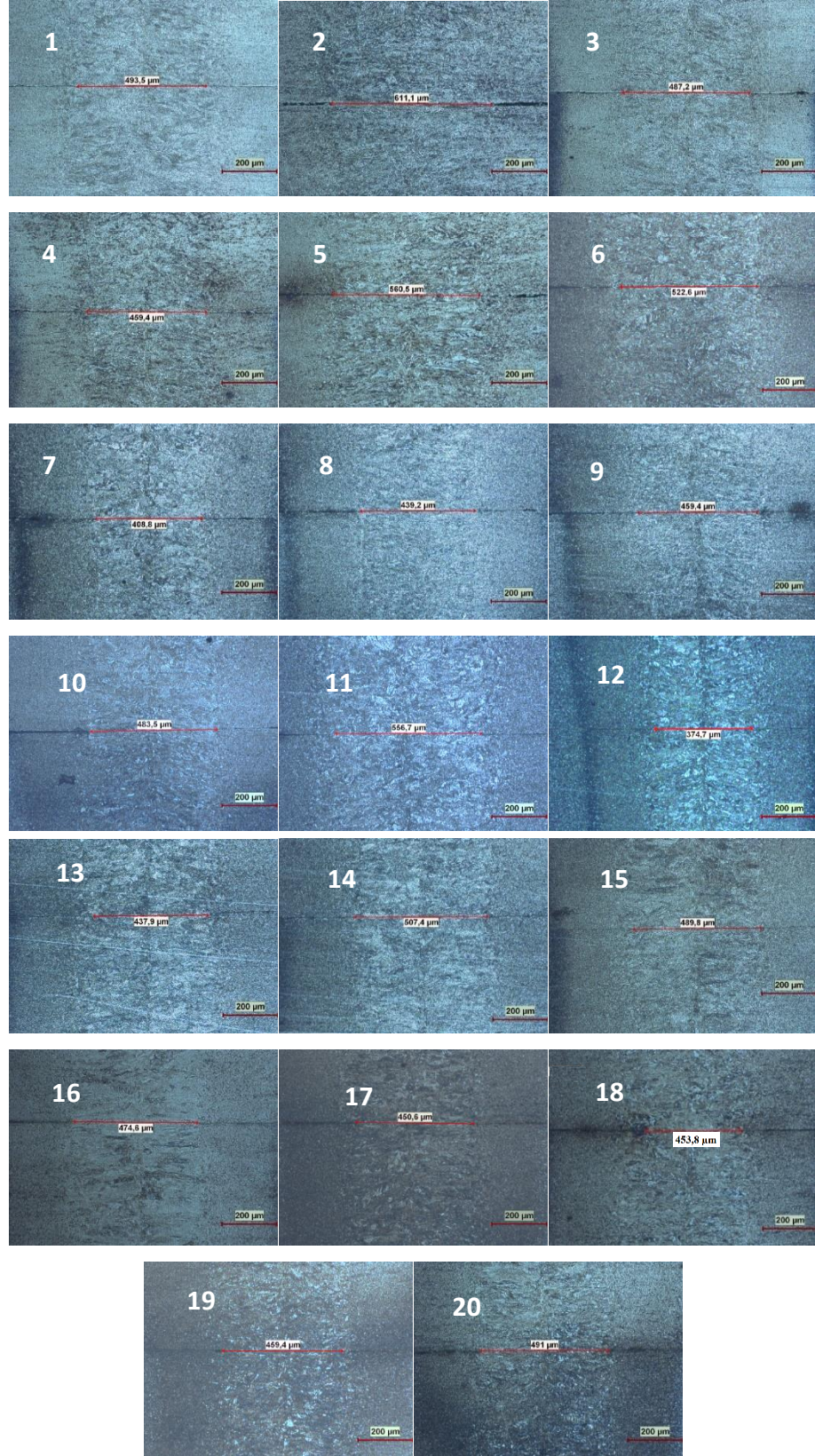
Bindirme kaynak bağlantısında EB içerisinde tam birleşmenin gerçekleşmediği, üst ve alt plaka arasında boşluk olduğu gözlenmiştir; bu durumun nedeni kaynak sırasında üst ve alt yüzeylerde boşluk kalmasıdır. Tam birleşmenin gerçekleştiği bölge görüntüleri elde edilmiştir (Şekil 4.7), ölçülen kaynak geometrileri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. (Bu bilgiler 4.6. Mekanik Dayanım İncelemeleri bölümünde maksimum kuvvet ile ilişkilendirilecektir). Kaynak bölgesinde EB ve ITAB genişlikleri ısı girdisi yükseldikçe artmaktadır, deney gruplarının lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısı parametrelerine göre yorumlamaları bir sonraki bölümde incelenmiştir.



Şekil 4.6. Kaynaklı numunelerin genel mikro yapı görüntüleri



Şekil 4.6. Kaynaklı numunelerin genel mikro yapı görüntüleri (devam)



Şekil 4.7. Numunelerin erime bölgesi tam birleşme durumları

**Çizelge 4.1.** Lazer kaynaklı deney numunelerinin kaynak geometri bilgileri

Deney No	Üst Plaka Max Genişlik (µm)	Üst Plaka Min Genişlik (µm)	Alt Plaka Min Genişlik (µm)	Alt Plaka Max Genişlik (µm)	Üst Plaka ITAB Genişliği (µm)	Alt Plaka ITAB Genişliği (µm)	Tam Birleşme Mesafesi (µm)
1	1851	1464	1319	1504	431,6	388,3	493,5
2	1999	1755	1487	1673	498,3	461,6	611,1
3	1668	1168	1080	1198	370,6	313,3	487,2
4	1652	1181	1090	1299	360,8	335,2	459,4
5	1718	1397	1264	1424	413,3	345,6	560,5
6	1793	1444	1326	1402	420,4	360,2	522,6
7	1432	1048	1008	1071	311,6	281,6	408,8
8	1540	1083	1035	1040	350,0	241,6	439,2
9	1460	1100	1048	854,5	295	251,6	459,4
10	1693	1221	1131	834,4	351,6	235	483,5
11	1858	1505	1356	1507	365,8	328,3	556,7
12	1394	919,7	912,2	877	308,3	255,2	374,7
13	1688	1208	1193	1331	376,6	313,3	437,9
14	1705	1339	1153	1389	391,7	318,3	507,4
15	1620	1196	1108	1256	353,4	268,3	489,8
16	1570	1156	1055	1218	395	318,3	474,6
17	1555	1015	1000	1128	336,7	238,3	450,6
18	1653	1156	1093	1289	361,7	241,2	453,8
19	1575	1120	1093	1008	353,4	268,3	459,4
20	1550	1166	1090	969,9	350	248,7	491,0

#### 4.3.1. Isı Girdisi ve Lazer Açısına Göre Kaynak Geometrisinin İncelenmesi

Bu bölümde proses parametre değişimlerinin kaynak geometrisine etkileri, deney grupları karşılaştırılarak incelenmiştir; Çizelge 4.1.'de bulunan kaynak geometrisi bilgileri lazer açısı ve ısı girdisi parametreleri özelinde detaylandırılarak yorumlanmıştır.



“9” ve “10” numaralı deney numuneleri eşit ilerleme hızı (55 mm/s) ve eşit lazer açısı (80°) parametreleri ile üretilmiştir. “9” numaralı deneyde en düşük seviye (2200 W), “10” numaralı deneyde en yüksek seviye (2800 W) lazer gücü parametreleri kullanılmıştır. Lazer gücü parametresinin minimum ve maksimum sınır değerlerinde olması kaynak geometrileri üzerinde de aynı etkiyi göstermiştir; ölçülen değerlerde genel olarak lazer gücü ile orantılı olarak “9” nolu numunede düşük, “10” nolu numunede yüksek uzunluklar elde edilmiştir.

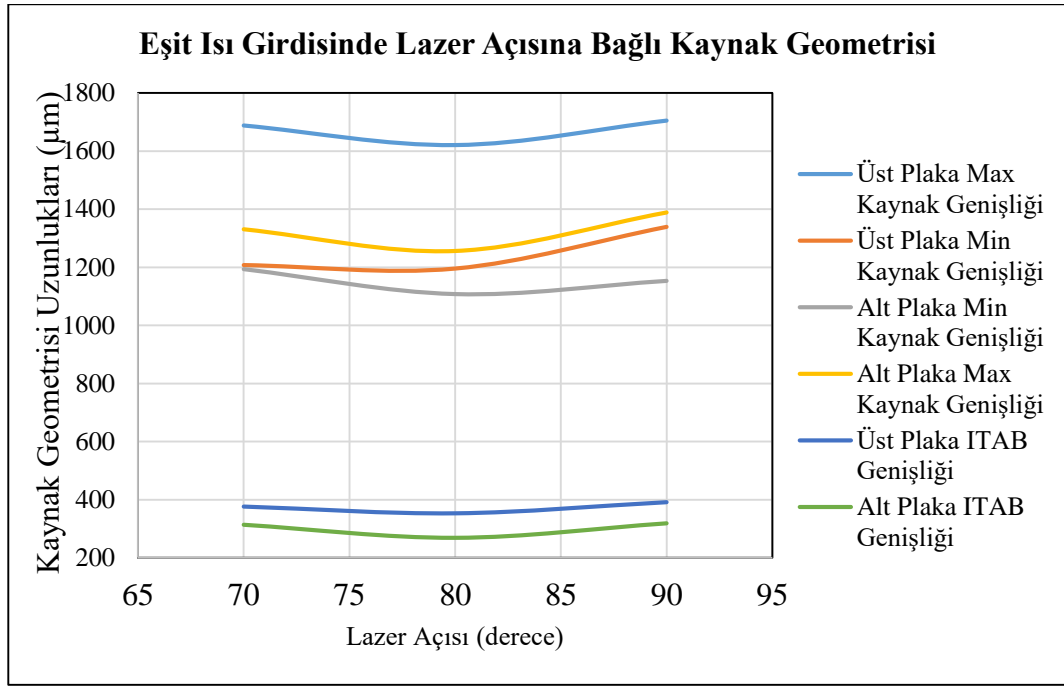
“1” ve “5” numaralı deney gruplarında eşit lazer gücü (2350 W) ve eşit ilerleme hızı (47,5 mm/s) kullanılmıştır; lazer açısı parametresi “1” numaralı numunede 75°, “5” numaralı numunede 85°’dir. Lazer açısı değişimine göre elde edilen kaynak geometri değerleri kıyaslandığında düşük olan 75°’de daha yüksek değerler elde edilmiş, 85° lazer açısında elde edilen kaynak geometri uzunlukları ise genel olarak daha düşük kalmıştır.

“3” ve “7” numaralı numuneler “1 ve 5” numunelerinde olduğu gibi eşit lazer gücü (2350 W) ve eşit ilerleme hızındadır (62,5 mm/s), lazer açısı parametresi farklıdır (75° ve 85°). İlerleme hızı “1 ve 5” numunelerine göre daha yüksek olduğundan ısı girdisi azalmıştır; ısı girdisinin daha düşük olmasına bağlı olarak geometrik uzunlukların “1 ve 5” numunelerine göre daha düşük değerlerde olduğu gözlemlenmektedir. Lazer açısı parametre değişimine göre inceleme yapıldığında ise 75° ile üretilen “3” numaralı numunenin, 85° ile üretilen “7” numaralı numuneye göre daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmektedir. Lazer ışınının kaynak yapılacak alana, açının düşürülerek gönderilmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği söylenebilir.

“11” ve “12” numaralı numunelerde lazer gücü ve lazer açısı sabit olup (lazer gücü: 2500 W, lazer açısı: 80°), ilerleme hızı değişkendir (“11” numaralı numune ilerleme hızı: 40 mm/s, “12” numaralı numune ilerleme hızı: 70 mm/s). İlerleme hızı artışı ile ısı girdisi düştüğünden ilerleme hızı yüksek olan “12” numaralı deney numunesinde ölçülen geometrik uzunluklar “11” numaralı numuneye göre düşük değerlerdedir.

“13”, “14” ve “15” numunelerinde lazer açısı parametresi değişken (70°, 90°, 80°), lazer gücü ve ilerleme hızı parametreleri sabit tutulmuştur (lazer gücü: 2500 W, ilerleme hızı:

55 mm/s), ısı girdisi 45,45 J/mm'dir. 70° ve 80° lazer açısı parametresine sahip "13" ve "15" numuneleri birbirine yakın geometrik uzunluklara sahiptir; "14" numaralı numunede ise daha yüksek değerler elde edilmiştir. "13", "14" ve "15" deney gruplarında lazer açısı değişiminin kaynak geometrisi üzerindeki etkisi Şekil 4.8'de yer almaktadır. 49,47 J/mm ısı girdisine sahip "1 ve 5" numuneleri, 37,6 J/mm ısı girdisine sahip "3 ve 7" numuneleri incelendiğinde 75° lazer açısının 85° lazer açısına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Parametre değerleri ısı girdisi özelinde değerlendirildiğinde lazer açısının, belirlenen ara seviyelerde tercih edilmesinden ise düşük ya da yüksek seviyede olmasının kaynak geometrisi açısından iyi sonuçlar verebileceği öngörülmektedir.



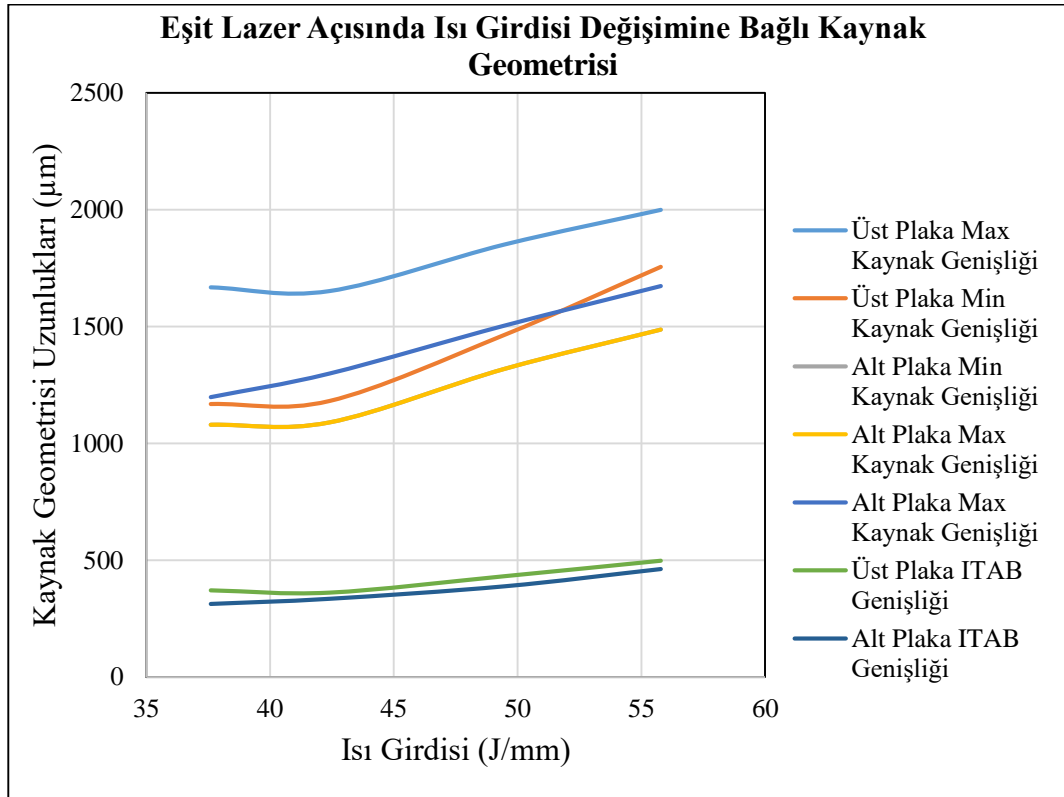
**Şekil 4.8.** Eşit ısı girdisinde lazer açısı değişiminin kaynak geometrisine etkisi

"2" ve "6" numaralı numuneler lazer gücü 2650 W, ilerleme hızı 62,5 mm/ s olacak şekilde üretilmiştir; lazer açısı parametresi "2" nolu numunede 75°, "6" numaralı numunede 85°'dir. Nispeten yüksek seviye lazer gücü ve düşük seviye ilerleme hızı kullanılması ısı girdisini artırmış, düşük lazer açısı ile de birleşince "2" numaralı numunede en yüksek kaynak geometri değerleri elde edilmiştir. Lazer açısı parametresi

kıyaslamaları daha önce elde edilen sonuçları destekler niteliktedir: lazer açısının düşük olması kaynak geometrisini olumlu yönde etkilemektedir.

“4” ve “8” numunelerinde lazer gücü 2650 W, ilerleme hızı 62,5 mm/s kullanılmıştır; lazer açısı parametreleri sırası ile 75° ve 85°'dir. İlerleme hızının daha yüksek olması itibarıyla “2 ve 6” numunelerine kıyasla ısı girdisi daha düşüktür, dolayısıyla daha düşük geometrik uzunluklara ulaşılmıştır. Lazer gücü ve ilerleme hızı sabit iken lazer açısı değiştirildiğinde düşük lazer açısında daha yüksek değerlere ulaşılmıştır, diğer numunelerde elde edilen sonuçları kanıtlar niteliktedir.

“1”, “2”, “3” ve “4” numaralı numunelerde lazer açısı parametresi aynı olup (75°), lazer gücü ve ilerleme hızı parametreleri farklıdır dolayısıyla ısı girdisi değişmektedir. Isı girdisi değişimine göre lazer kaynak geometrilerini inceleyebilmek adına grafik çizdirilmiştir (Şekil 4.9). Eşit lazer açısı parametresi ile üretilen numunelerde ısı girdisi arttıkça kaynak havuzu genişlemekte ve kaynak geometrisi boyutları artmaktadır.



**Şekil 4.9.** Eşit lazer açısında ısı girdisi değişiminin kaynak geometrisine etkisi

#### 4.4. Kaynak Bölgelerinin Mikro Yapı İncelemeleri

Lazer kaynak sırasında, kaynak yapılan malzemede ergime ve katılma olayları gerçekleşmektedir. Ergiyen temel malzemenin dengesiz katılması sonucunda erime bölgesi oluşmaktadır. EB sınırlarından kaynak merkezine doğru büyüyen sütunlu taneler, epitaksiyel katılma gerçekleştirmektedir: epitaksiyel katılma, erime sınırındaki tanelerin yönlendirildiği yönde büyümeyi ifade etmektedir. DP çeliklerinde EB iğne yapılı martenzit yapısındadır, EB yüksek sertliğe sahip olması bu özelliğinden kaynaklanmaktadır (Alves ve ark. 2018).

EB mikro yapısı soğuma hızı ve malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Yüksek kaynak hızları ve güç yoğunluğu sayesinde dar bir alanda derin penetrasyon ve dar kaynak genişlikleri elde edilmektedir, soğuma hızı yüksektir. Kaynak hızı ne kadar yüksekse soğuma hızı da yüksek olmaktadır; soğuma hızı DP çeliklerinde kritik soğuma hızından genellikle daha yüksektir. EB mikro yapısı, temel malzemenin kimyasal kompozisyonuna da bağlıdır. Burada Karbon oranı ön plana çıkmaktadır; Karbon, sertliği artırarak sürekli soğuma dönüşüm eğrisini sağa doğru kaydırmaktadır. Manganez, Silikon, Alüminyum, Krom ve Molibden gibi diğer alaşım ilaveleri de ferrit ve beyrit oluşumunu geciktirerek çeliğin sertleşebilirliğini artırarak martenzit oluşumunu artırmaktadır. Yüksek soğuma hızları ve malzemenin kimyasal kompozisyonu ile ilişkili olarak EB genellikle martenzit yapıdadır.

Lazer kaynak sırasında termal etki dolayısıyla ITAB'da hızlı soğuma ve katılma meydana gelmektedir ve farklı faz yapıları oluşmaktadır. Kaynak merkezinden itibaren mesafe, yerel maksimum sıcaklık, soğuma hızı ve sıcaklığa maruz kalma süresi farklılıkları dolayısıyla faz dönüşümleri sırasında farklı mikro yapılar oluşmaktadır. ITAB dört alt bölgeye ayrılabilir: kaba taneli ITAB (KT-ITAB), ince taneli ITAB (İT-ITAB), inter kritik ITAB (İK-ITAB) ve alt kritik ITAB (AK-ITAB) (Lian Chen ve ark. 2020).

KT-ITAB bölgesinde kaynak sıcaklığı  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerindedir ve yeniden kristalleşme gerçekleşmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle yeniden kristalleşme devam

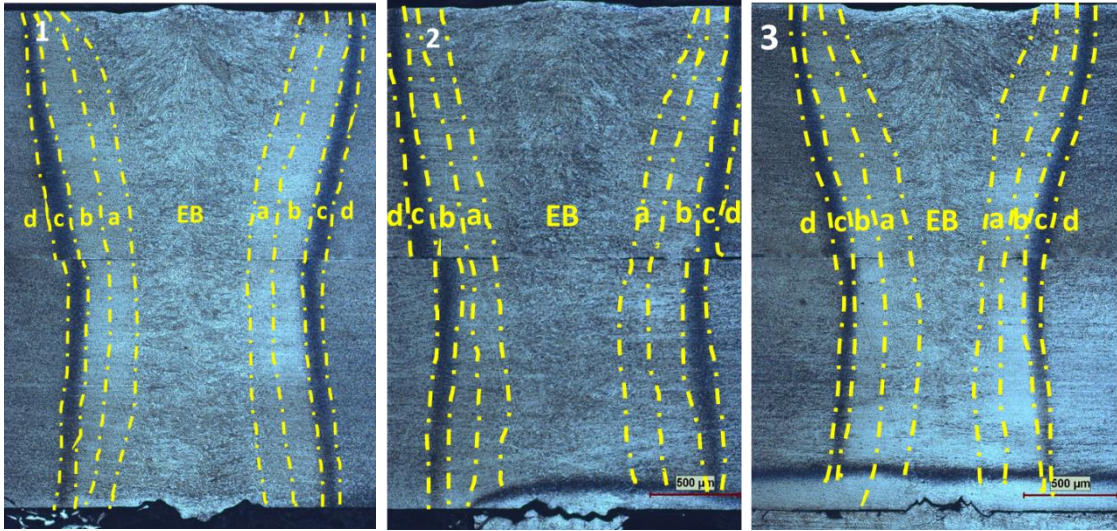
etmekte (ikinci yeniden kristalleşme) ve tane irileşmesine neden olmaktadır. İnce taneli ITAB bölgesinde kaynak sıcaklığı  $A_{c3}$  sıcaklığının üzerinde olmasına rağmen KT-ITAB bölgesine kıyasla daha düşüktür; yeniden kristalleşme bu bölgede de gerçekleşmektedir. Birincil östenit taneleri korunur ve taneler büyümmez, ince taneli bir iç yapı oluşmaktadır. KT-ITAB ve İT-ITAB bölgeleri bazı kaynaklarda süper kritik ITAB olarak isimlendirilmektedir (Nayak ve ark. 2015). Temel malzemenin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasıyla, KT-ITAB ve İT-ITAB bölgelerinde temel malzeme tamamen östenite dönüşmekte soğuma sonrasında ise martenzit oluşmaktadır. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça (temel malzemeye doğru) maksimum sıcaklık düşmektedir: KT-ITAB, EB'ye yakın olmasıyla yüksek sıcaklıklara maruz kalmakta ve dolayısıyla tanelerde kabalaşma ve irileşme gerçekleşmektedir, İT-ITAB bölgesi kaynak merkezine daha uzak olduğundan KT-ITAB bölgesine nazaran daha düşük sıcaklıklara erişebilmekte ve ince taneli bir yapı ortaya çıkmaktadır (Y. Liu ve ark. 2018b).

İK-ITAB bölgesinde sıcaklık, östenitlemenin başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasındadır ( $A_{c1}$ - $A_{c3}$ ), iri ve ince taneler bulunmaktadır. Sıcaklık  $A_{c1}$  üzerine çıktığı için östenit oluşmaya başlar, tane sınırlarında çekirdeklenen östenit soğuma sonrasında martenzite dönüşmektedir; temel malzemede ferrit değişmeden kalmaktadır ancak ferrit fraksiyonu temel malzeme ile karşılaştırıldığında daha ince tanelidir. Martenzitin hacim oranı, maksimum sıcaklığın  $A_{c1}$ 'den  $A_{c3}$  sıcaklığına yükselmesiyle artmaktadır (Di ve ark. 2017).

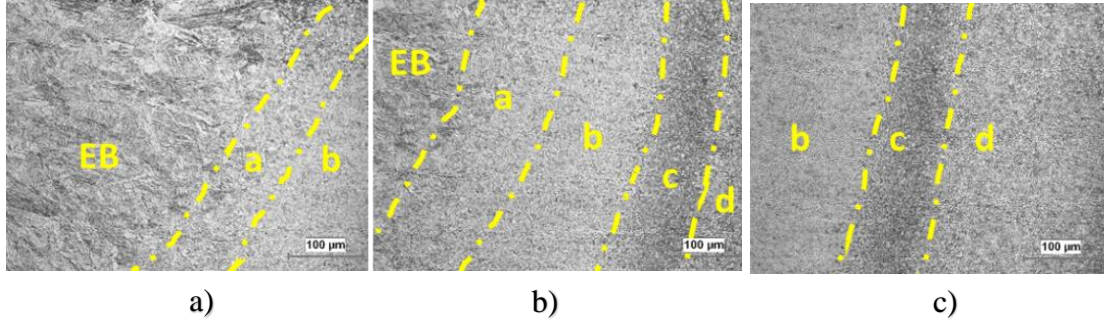
AK-ITAB bölgesinde maksimum sıcaklık  $A_{c1}$  çizgisinin altındadır, temel malzemedeki martenzit fazı temperlenmektedir, ferrit fazı değişmeden kalmaktadır; mikro yapı temperlenmiş martenzit ve ferritten oluşmaktadır. Temperlenmiş martenzit oluşumu, martenzitin temperleme sıcaklığında bozunması olarak düşünülebilir; ana özelliği martenzitin yeniden kristalleşmesi ve karbürlerin çökmesidir, oluşum itibariyle izotermal olmayan bir temperleme işlemidir. Malzemenin ısınma sıcaklığı ve hızı, maksimum sıcaklığa maruz kaldığı süre parametreleri etkili olmaktadır. Temperlenmiş martenzit ITAB bölgesinin yumuşamasına ve sertliğin düşmesine neden olmaktadır. Temperleme sıcaklığındaki azalma nedeniyle,  $A_{c1}$  sıcaklığından uzaklaştıkça yumuşamanın şiddeti azalmakta; artan ısı girdisi ile ITAB yumuşaması şiddeti

artmaktadır. DP1200 çeliklerinde temel malzeme mikro yapısı ise martenzit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır (Wang ve ark. 2017).

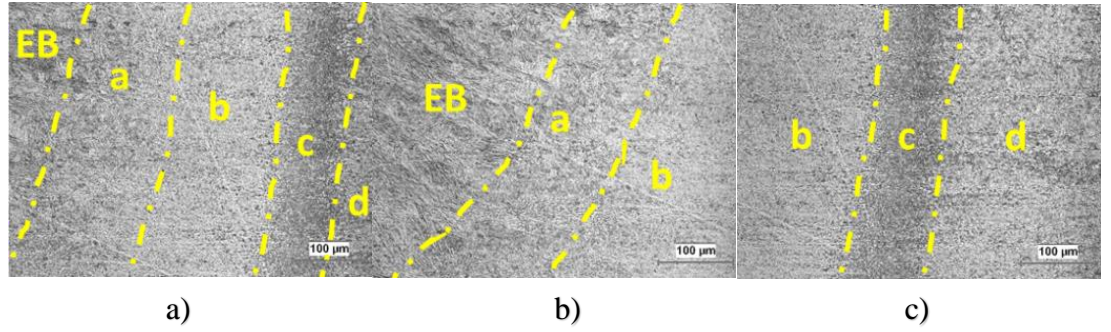
Lazer kaynaklı bağlantıların mikro yapı gelişimlerini detaylı incelemek için “1” (lazer gücü: 2350 W, ilerleme hızı: 47,5 mm/s, lazer açısı: 75°, ısı girdisi: 49,47 J/mm), “2” (lazer gücü: 2650 W, ilerleme hızı: 47,5 mm/s, lazer açısı: 75°, ısı girdisi: 55,79 J/mm), “3” (lazer gücü: 2350 W, ilerleme hızı: 62,5 mm/s, lazer açısı: 75°, ısı girdisi: 37,60 J/mm)” numaralı numuneler seçilmiş, 200 ve 500 büyütmelerde optik mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Numunelerin 50 büyütme altındaki genel mikro yapı görüntülerinde EB ve ITAB bölgeleri işaretlenerek gösterilmiştir (Şekil 4.10); a, b, c ve d ile ifade edilen bölgeler sırası ile KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB bölgeleridir. Kaynak merkezinden itibaren sırasıyla EB, KT-ITAB, İT-ITAB, İK-ITAB ve AK-ITAB ve temel malzeme (TM) bölgeleri oluşmaktadır. Bölgelerin iç yapıları bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir. “1”, “2” ve “3” numaralı numunelerin 200 büyütme altında görüntüleri sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de bulunmaktadır.



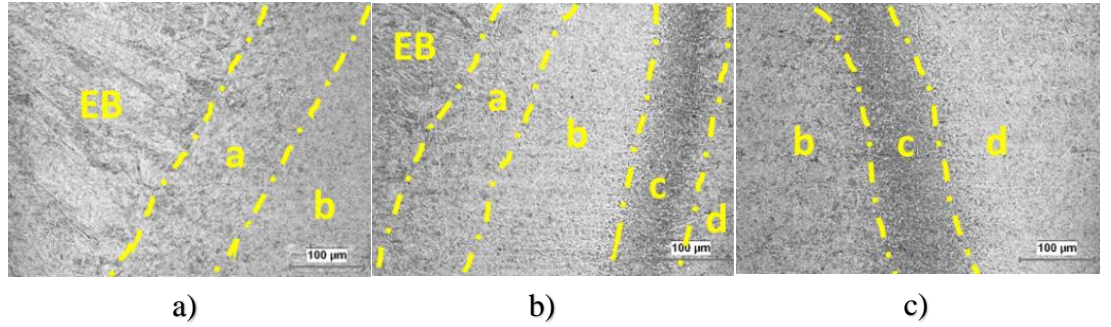
**Şekil 4.10.** “1”, “2” ve “3” numaralı numunelerin genel mikro yapı görüntüleri (a:KT-ITAB, b: İT-ITAB, c: İK-ITAB, d:AK-ITAB)



**Şekil 4.11.** “1” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri



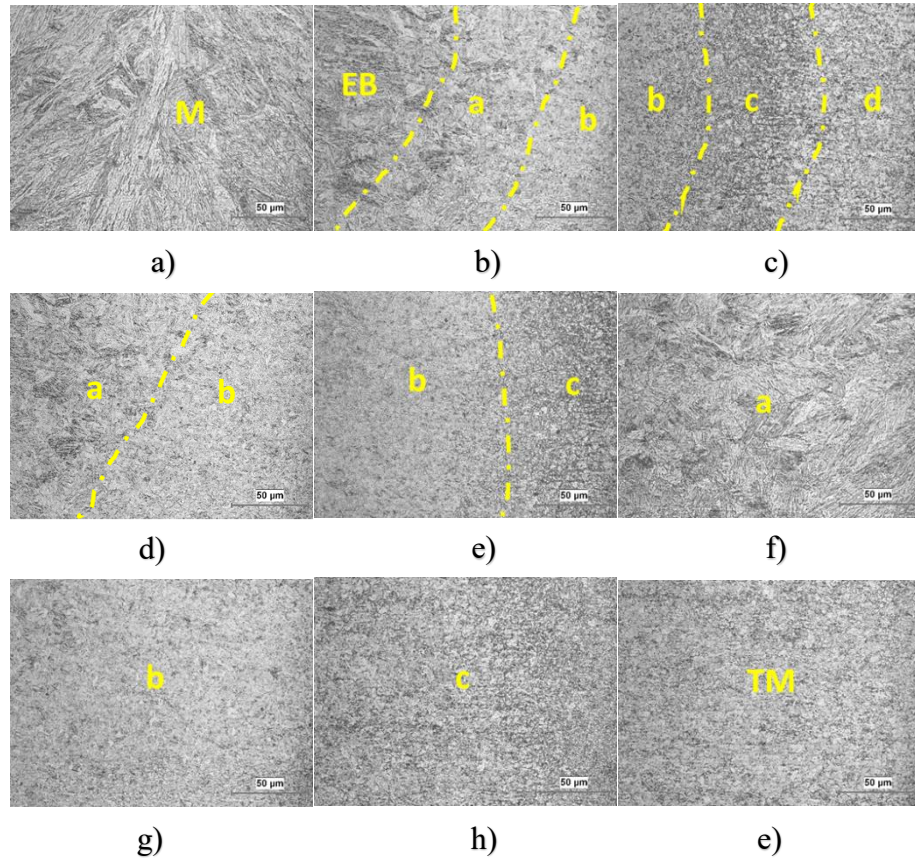
**Şekil 4.12.** “2” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri



**Şekil 4.13.** “3” numaralı numune 200 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri

EB mikro yapısı ısı girdisinden önemli ölçüde etkilenmektedir; birincil östenit tanelerinin boyutu yüksek ısı girdisinde artmakta, düşük ısı girdisinde küçülmektedir. Bu nedenle EB oluşan martenzit yapısı, ısı girdisine göre farklılaşmaktadır: düşük ısı girdisine (37,6 J/mm) sahip “3” numaralı numunede, soğuma yönleri doğrultusunda devam eden oldukça uzun yapılı ve ince taneli martenzit bulunmaktadır. Yüksek ısı girdisine (55,79 J/mm) sahip “2” numaralı numunede oluşan martenzit yapısı kısa, küt,

kalın ve sütunlu yapıdadır. “1” numaralı numunenin ısı girdisi değeri (49,47 J/mm), “2” numaralı numuneye yakın olduğundan mikro yapıları benzerdir, ancak parametrelere bağlı olarak ısı girdisinin nispeten düşük olması nedeniyle martenzit yapısı biraz daha uzun ve incedir. Numunelerin tüm faz bölgelerini içeren 500 büyütme altındaki mikro yapı görüntüleri “1”, “2” ve “3” numuneleri için sırasıyla Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da bulunmaktadır.

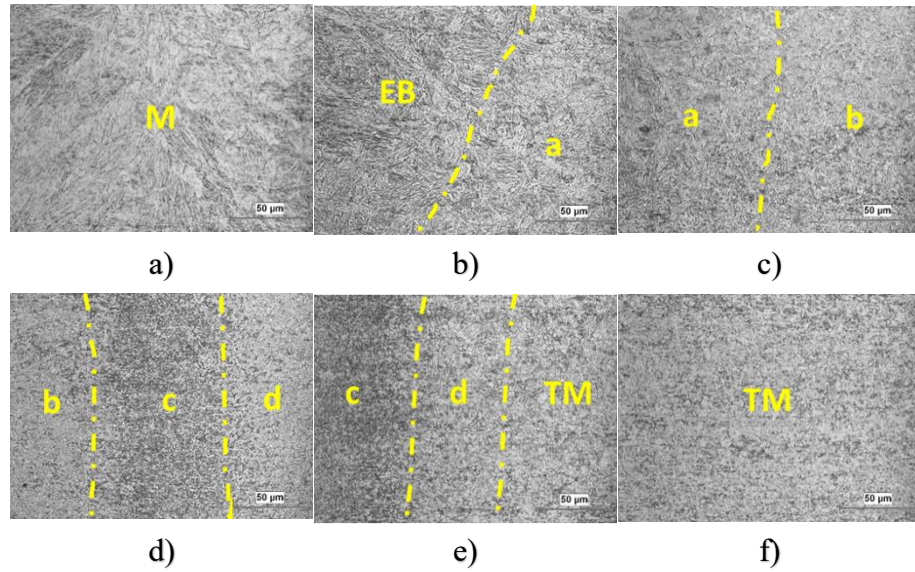


**Şekil 4.14.** “1” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri

Numunelerin KT-ITAB ve İT-ITAB bölgelerinde genel olarak martenzit bulunmaktadır ancak üretim parametreleri nedeniyle tane yapıları ve boyutları farklılaşmaktadır. “2” numaralı numune yüksek lazer gücü ve düşük ilerleme hızına sahip olduğundan yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmış ve ısı girdisi fazladır; KT-ITAB bölgesi martenzit tane yapıları diğer numunelere kıyasla irileşmiştir, kısa ve küt şekildedir. “1” nolu numune, “2” ile kıyaslandığında düşük lazer gücüne sahip olduğundan ısı girdisi düşüktür ve tane yapısı daha incedir. “3 numaralı numune düşük lazer gücü ve yüksek

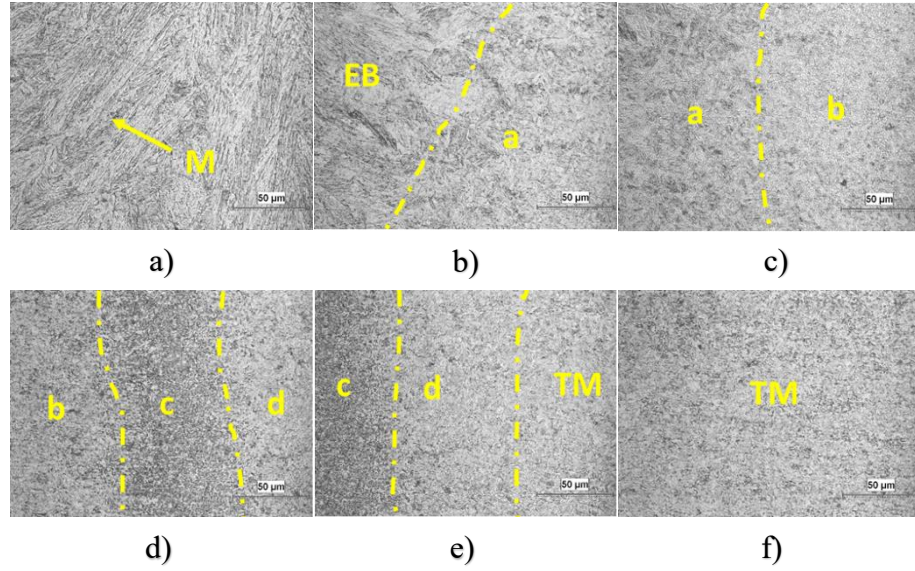


ilerleme hızı ile üretilmesiyle düşük ısı girdisi sayesinde martenzit yapısına sahiptir. Kaynak merkezine uzaklık itibariyle maruz kalınan maksimum sıcaklık, süre ve soğuma hızı, İT-ITAB bölgesinde KT-ITAB bölgesine kıyasla düşmektedir, bu bölgede daha ince yapılı martenzit oluşumları mevcuttur. İT-ITAB bölgesinde ince taneli yapının ortaya çıkmasının bir nedeni de yeniden kristalleşmenin gerçekleşmesidir. KT-ITAB bölgesinde de yeniden kristalleşme gerçekleşmekte ancak sıcaklık ve süre daha uzun olduğundan taneler ikincil tane büyümelerine yaklaşmaktadır. “2” nolu numunede yüksek ısı girdisine uzun süre maruz kalınmasıyla oluşan yapılar daha kaba ve iri tanelidir. “1 ve 3” numuneleri, “2” ile kıyaslandığında daha ince yapılı martenzit oluşumları mevcuttur. EB ile KT-ITAB ve İT-ITAB iç yapıları martenzitten oluşmaktadır. İT-ITAB bölgesi EB kıyasla daha ince taneli martenzit yapısından oluşmaktadır; bu durum İT-ITAB bölgesinde sertliğin EB’den yüksek olmasına neden olacaktır.



**Şekil 4.15.** “2” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri

DP1200 temel malzemesinde yüksek oranda martenzit bulunduğu için İT-ITAB bölgesi net olarak ortaya çıkmıştır, siyah renkli olan bölge mikro yapı görüntülerinde net olarak gözlemlenebilmektedir. Bu bölgelerde martenzit ve ferritten oluşan kaba ve ince taneli karışık bir yapı mevcuttur. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ferrit hacim fraksiyonu artmaktadır, martenzit hacminin ise azaldığı gözlenmektedir.



**Şekil 4.16.** “3” numaralı numune 500 kat büyütme altında mikro yapı görüntüleri

AK-ITAB bölgesinde maruz kalınan düşük sıcaklık dolayısıyla martenzit yapısı temperlenmektedir. Artan ısı girdisinde martenzit yapısında yüksek oranda temperleme mevcuttur. Buna göre “2” nolu numunede yüksek oranda temperlenmiş martenzit yapısı bulunurken “3” nolu numunede temperlenmiş martenzit oranı daha düşüktür. Bu bölgedeki bozunmuş martenzit yapısı sertliğin önemli ölçüde düşmesine neden olacaktır. Temel malzeme yapısı ise martenzit ve ferritten oluşmaktadır.

#### 4.5. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde fiber lazer kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin ölçülen mikro sertlik değerleri yorumlanmıştır: “1”, “2”, “3” numaralı numunelerde üst ve alt plaka için, “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numunelerde sadece üst plaka için Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir, gruplar kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Mikro sertlik grafiklerinde EB, ITAB, TM bölgeleri işaretlenmiş, bölgelerin sınırlarının tespitinde kaynak geometrisi değerlerinden de yararlanılmıştır.

Tüm numunelerde genel olarak benzer yapıda mikro sertlik grafikleri elde edilmiştir. EB mikro sertliği, martenzit yapısı nedeniyle TM mikro sertliğinden yüksektir. ITAB

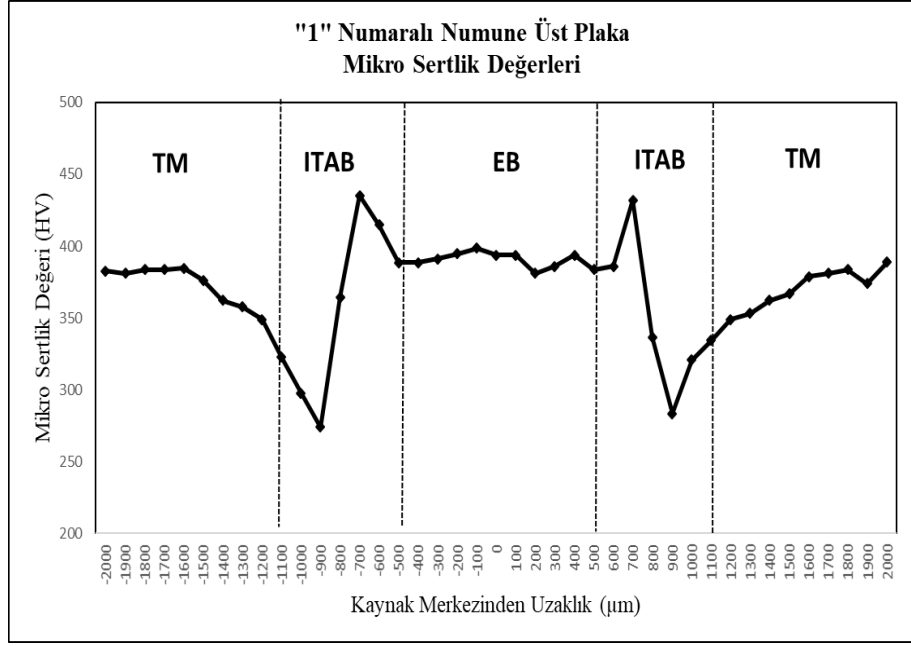
sertliği öncelikle artış, sonrasında ise ciddi bir düşüş eğilimindedir. Mikro sertliğin arttığı İT-ITAB'da martenzitin incilmesi ile EB'den daha yüksek değerlerde mikro sertlik değerleri elde edilmiştir, lazer kaynak sırasında tamamen östenitlenen yapı yeniden kristalize olmuştur. Mikro sertlik değerlerinde ciddi azalmanın görüldüğü AK-ITAB'da ise temperlenmiş martenzit yapısından kaynaklı değerlerde düşüş yaşanmaktadır; temel malzeme sertlik değerlerinin de altına inmektedir, bu bölge “yumuşama bölgesi” olarak adlandırılmaktadır. Yumuşama bölgesi DP600 malzemelerde oluşmamakta, DP800, DP980, DP1000, DP1200 serilerinde gözlemlenmektedir; yüksek martenzit içeriğine sahip DP çeliklerinde yumuşama hızlı gerçekleşmektedir (Bandyopadhyay ve ark. 2014, Oğuz Tunçel 2020).

“1”, “2” ve “3” numaralı numunelerin üst plaka ve alt plaka için ölçülen sertlik değerlerinin grafikleri sırasıyla Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19'da yer almaktadır. Isı girdisinin, kaynaklı bağlantı enine kesit mikro sertliği üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Isı girdisinde azalma ile birlikte martenzit yapısı daha ince taneli olmakta ve EB'de sertlik artmaktadır; ısı girdisindeki artış ise kalın martenzit yapılarına neden olmakta dolayısıyla EB'de sertlik düşüşü yaşanmaktadır. Yüksek ısı girdisine (55,79 J/mm) sahip “2” numaralı numunede üst ve alt plakalarda EB sertliklerinin ortalamaları sırasıyla 372,56  $HV_{0,05}$  ve 378,18  $HV_{0,05}$  'dir, en düşük mikro sertlik değerleri bu numunede elde edilmiştir. “1” numaralı numune (ısı girdisi: 49,47 J/mm) EB mikro sertlik ortalamaları üst plaka ve alt plaka için 390,17  $HV_{0,05}$  ve 385,42  $HV_{0,05}$  değerlerindedir. “3” numaralı numunede (ısı girdisi: 37,60 J/mm) ise üst plaka mikro sertlik 399,92  $HV_{0,05}$ , alt plaka mikro sertlik 392,98  $HV_{0,05}$  değerlerine ulaşmıştır. Isı girdisi azaldıkça elde edilen sertlik değerleri artmaktadır. “1” ve “3” numaralı numuneler eşit lazer gücünde olması nedeniyle EB sertlik değerleri birbirine yakındır, ilerleme hızı farklılığından dolayı “3” numaralı numunede ısı girdisi düşük olduğundan EB ince martenzitik yapıdadır dolayısıyla sertlik değerleri artmıştır. Üst plaka ve alt plaka için ölçülen mikro sertlik değerleri arasında fazla bir fark bulunmamaktadır. “2” ve “3” numaralı numuneler arasında yaklaşık 14-20  $HV_{0,05}$  farklılık bulunmaktadır.

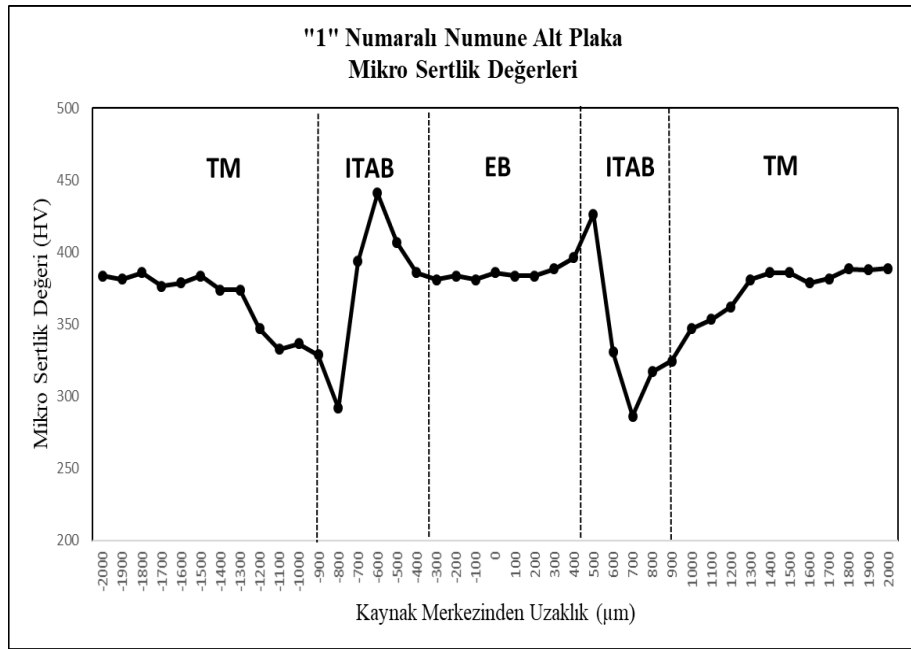
ITAB bölgesinde mikro sertlik İT-ITAB'da artmakta, sonrasında AK-ITAB bölgesinde yumuşama bölgesi oluşarak düşüş yaşanmaktadır. “1” numaralı numunede maksimum

mikrosertliğin elde edildiği İT-ITAB bölgesi değerleri üst plaka ve alt plaka için 435  $HV_{0,05}$  ve 441  $HV_{0,05}$ 'dir. "2" numaralı numune için ITAB maksimum mikro sertlik değerleri üst plaka için 435  $HV_{0,05}$ , alt plaka için 432  $HV_{0,05}$ 'dir. "3" numaralı numunenin ITAB bölgesinde elde edilen maksimum mikro sertlik değerleri üst plaka ve alt plaka için sırasıyla 453,3  $HV_{0,05}$  ve 441  $HV_{0,05}$ 'dir. Isı girdisinin düşük olduğu "3" numaralı numunede en yüksek değerlere ulaşılmış, ısı girdisinin yüksek olduğu "2" numaralı numunede diğerlerine kıyasla daha düşük değerlere ulaşılmıştır; EB olduğu gibi ITAB bölgesinde de ısı girdisi etkisiyle martenzit yapısının incilmesi ve kalınlaşması etkili olmuştur. Ayrıca ısı girdisi yüksek olduğundan kaynak geometrisi uzunlukları diğer numunelere kıyasla daha geniştir. "1" numaralı numune üst plaka ve alt plaka yumuşama bölgesinde elde edilen değerler 273,9  $HV_{0,05}$  ve 286,2  $HV_{0,05}$ 'dir. "2" numaralı numunede üst plaka ve alt plaka ITAB bölgesinde elde edilen minimum değerler 273,9  $HV_{0,05}$  ve 275,4  $HV_{0,05}$ 'dir. "3" numaralı numunede üst plaka ve alt plaka için ölçülen değerler 278,4  $HV_{0,05}$  ve 281,5  $HV_{0,05}$ 'dir. ITAB maksimum değerlerde olduğu gibi ısı girdisinin sertlik üzerine etkileri yumuşama bölgesi değerlerinde de gözlemlenmektedir: ısı girdisi yüksek olan "2" numaralı numunede daha düşük değerler elde edilirken, ısı girdisi düşük olan "3" numaralı numunede nispeten daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Temel malzemede ölçülen değerler tüm numuneler için birbirine yakındır, değişkenlik bulunmamaktadır. "1", "2" ve "3" numaralı numuneler için temel malzeme bölgesi ölçülen değerler ortalamaları sırasıyla 367,11  $HV_{0,05}$ , 364,66  $HV_{0,05}$ , 368,67  $HV_{0,05}$ 'dir. "1", "2" ve "3" numaralı numuneler için ölçülen Vickers mikro sertlik değerleri EKLER bölümünde EK-1 içerisinde yer almaktadır.

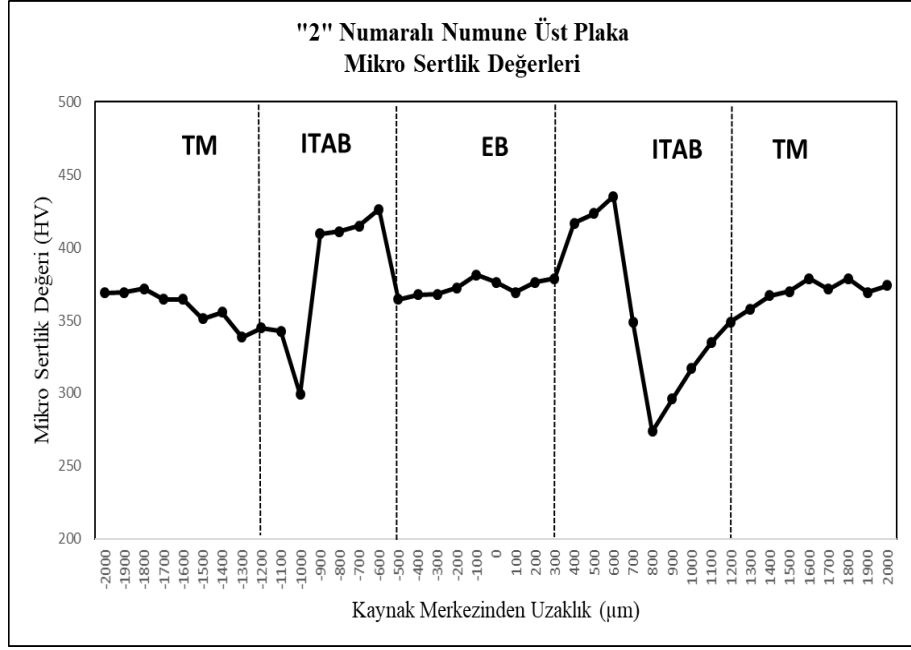


a)

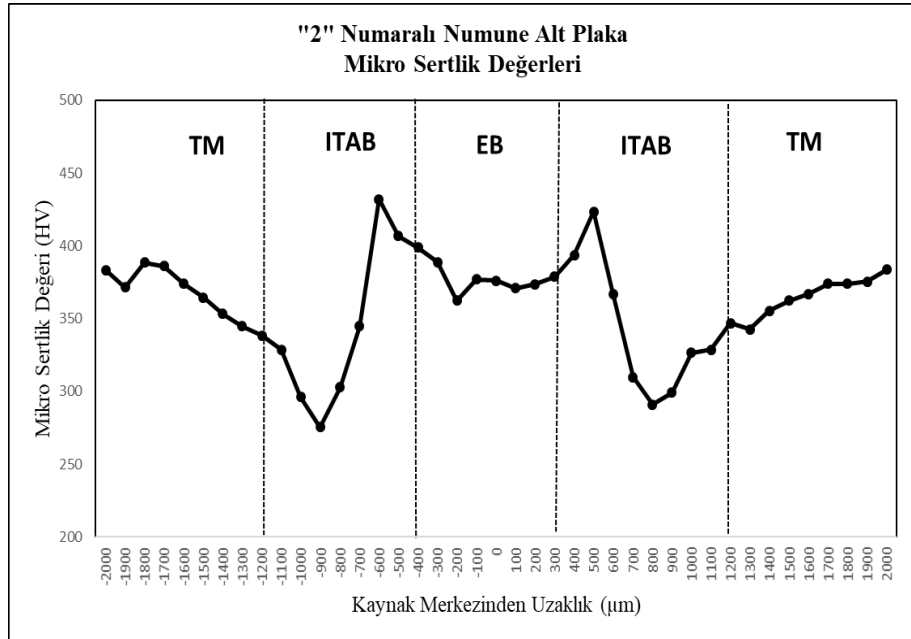


b)

**Şekil 4.17.** “1” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri

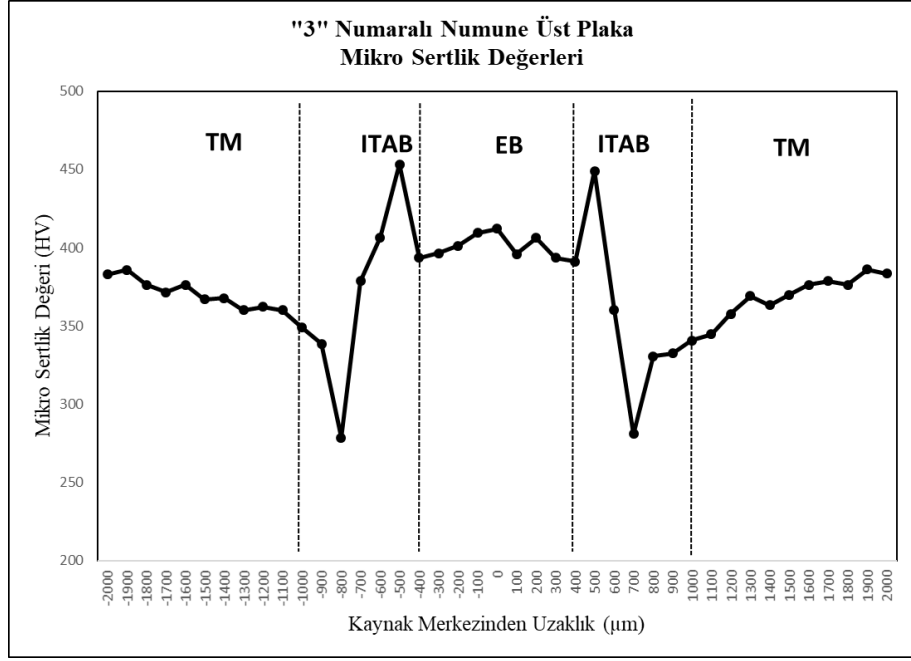


a)

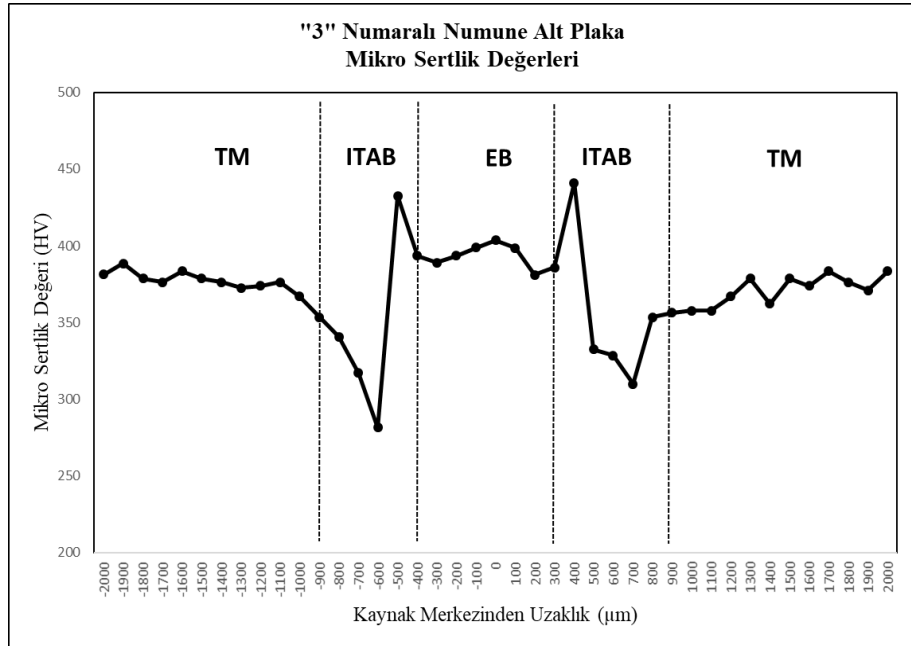


b)

**Şekil 4.18.** “2” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri



a)

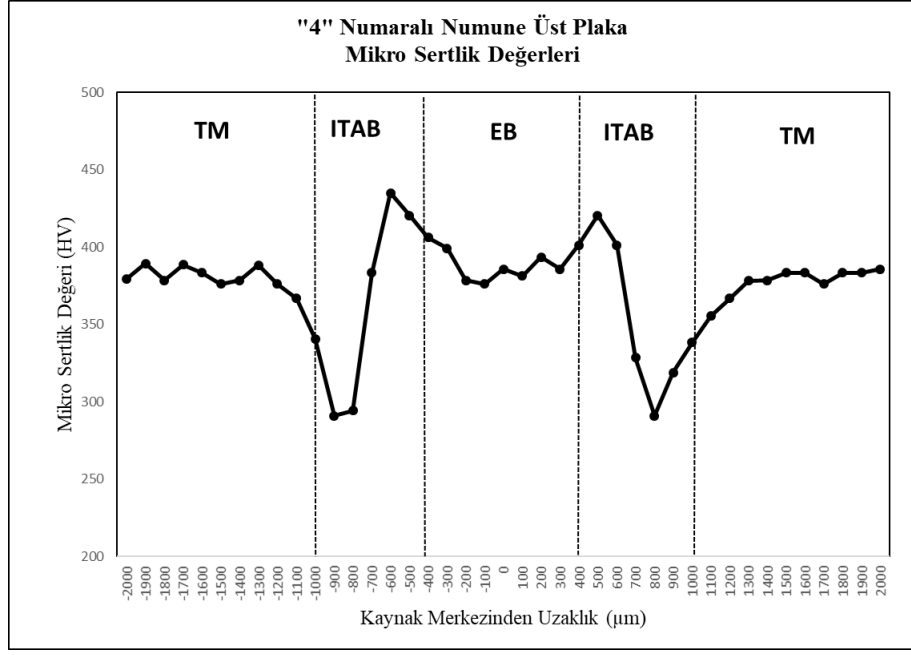


b)

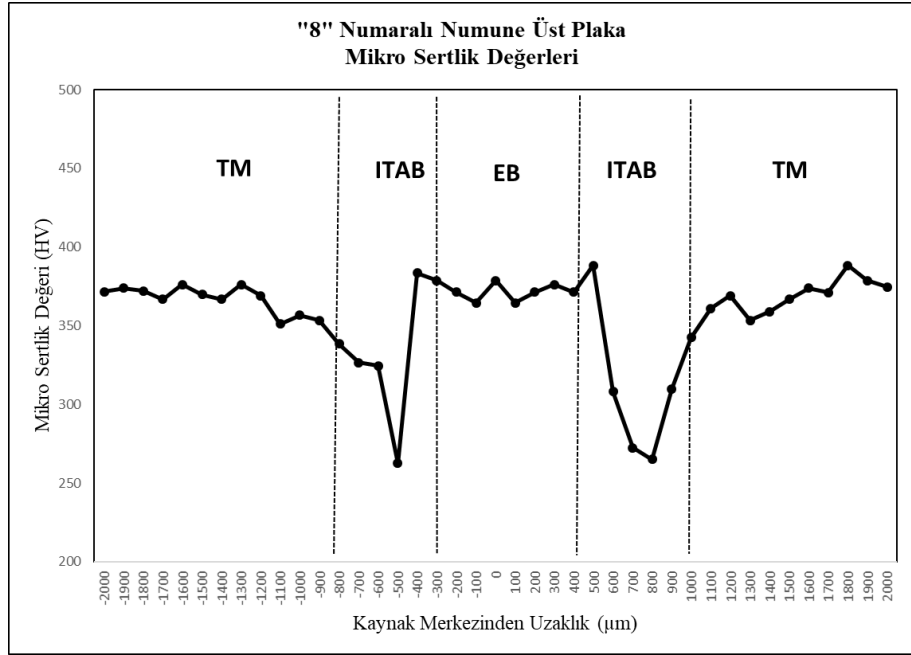
**Şekil 4.19.** “3” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi a) üst plakada ölçülen mikro sertlik değerleri b) alt plakada ölçülen mikro sertlik değerleri

“4”, “8”, “13”, “14” ve “15” numaralı numunelerin ölçülen mikro sertlik değerleri grafikleri Şekil 4.20- Şekil 4.24’de gösterilmektedir. “4” ve “8” numuneleri eşit lazer gücü (2650 W) ve ilerleme hızına (62,5 mm/s) sahip olmasıyla ısı girdisi aynıdır (42,40 J/mm), lazer açısı değişkenlik göstermektedir (“4” numaralı numune için 75°, “8” numaralı numune için 85°). “13”, “14” ve “15” numaralı numuneler eşit lazer gücü (2500 W) ve ilerleme hızı (55 mm/s) sayesinde eşit ısı girdisindedir (45,45 J/mm), lazer açısı parametreleri farklıdır (“13” numaralı numune için 70°, “14” numaralı numune için 90°, “15” numaralı numune için 80°). EB sertlik ortalamaları “4” numaralı numune için 389,84  $HV_{0,05}$ , “8” numaralı numune için 372,08  $HV_{0,05}$ , “13” numaralı numune için 383,64  $HV_{0,05}$ , “14” numaralı numune için 377,96  $HV_{0,05}$ , “15” numaralı numune için 378,56  $HV_{0,05}$ ’dir. “13”, “14”, “15” numuneleri birlikte değerlendirildiğinde lazer açısı yüksek olan “14” numaralı numunede daha düşük sertlik değerleri elde edilirken lazer açısı düşük olan “13” numaralı numunede daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numunelerin ITAB bölgesinde maksimum sertlik değerleri sırasıyla 435  $HV_{0,05}$ , 388,4  $HV_{0,05}$ , 420,5  $HV_{0,05}$ , 423,3  $HV_{0,05}$ , 426,2  $HV_{0,05}$ ; maksimum mikro sertlik değerlerine İT-ITAB bölgesinde ulaşılmaktadır, ısı girdisi birbirine yakın olduğundan ölçülen değerler genel olarak birbirine yakındır. Yumuşama bölgesi olarak tanımlanan AK-ITAB’da ise minimum mikro sertlik değerleri elde edilmektedir. “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler için ölçülen değerler sırasıyla 291  $HV_{0,05}$ , 262,5  $HV_{0,05}$ , 278,4  $HV_{0,05}$ , 252,8  $HV_{0,05}$ , 272,6  $HV_{0,05}$ ’dir. Sertlik değerleri birbirine yakın olmakla birlikte, EB ile karşılaştırıldığında yaklaşık %25-%30 düşüş yaşanmıştır. Temel malzeme mikro sertlik ortalamaları ise 363,02  $HV_{0,05}$ , 365,86  $HV_{0,05}$ , 368,37  $HV_{0,05}$ , 365,08  $HV_{0,05}$ , 364,54  $HV_{0,05}$ ’dir; temel malzeme mikro sertlik değerleri değişkenlik göstermemektedir. “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numunelerin mikro sertlik ölçüm değerleri EKLER bölümünde EK-2 içerisinde yer almaktadır.

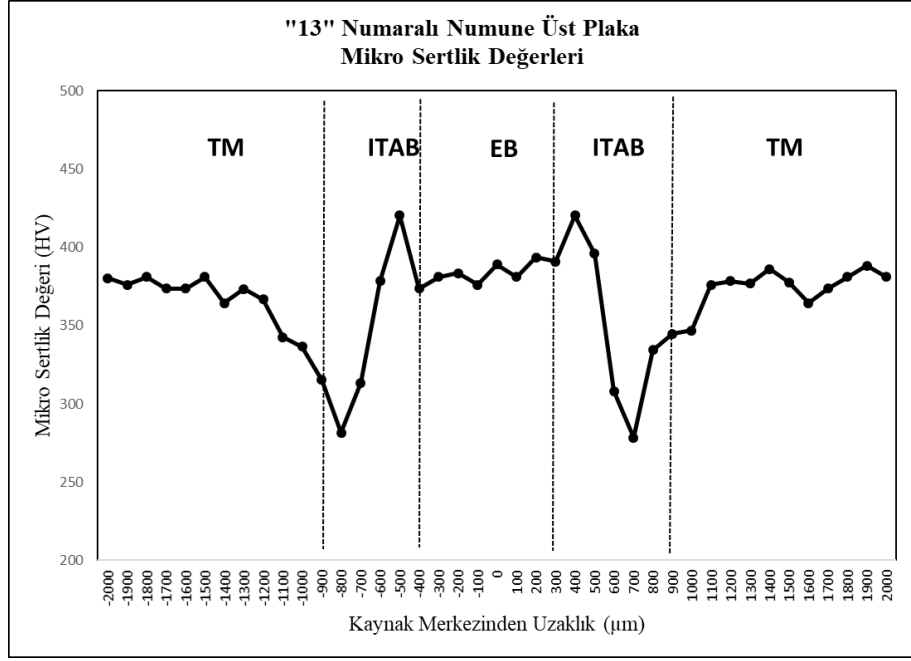




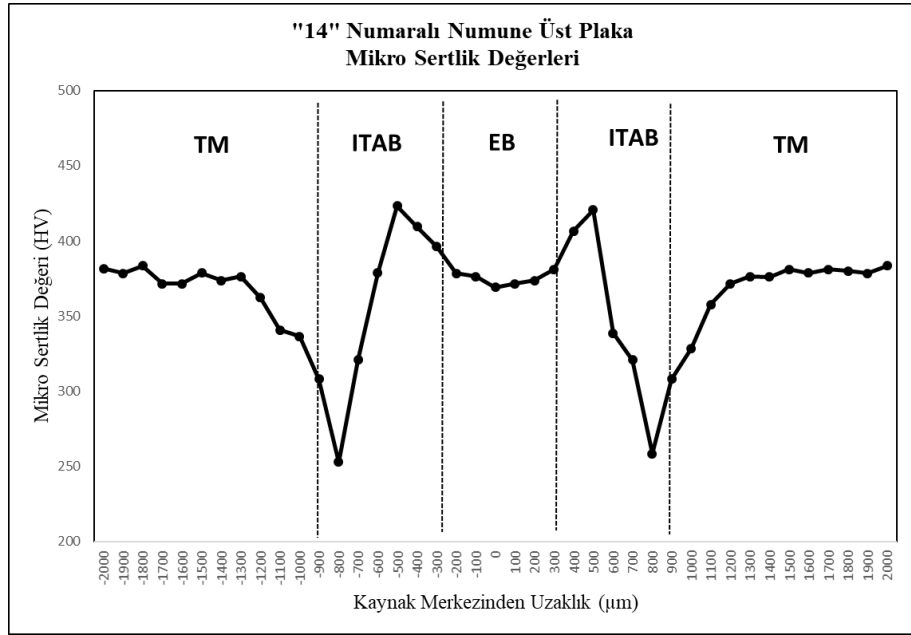
Şekil 4.20. "4" numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



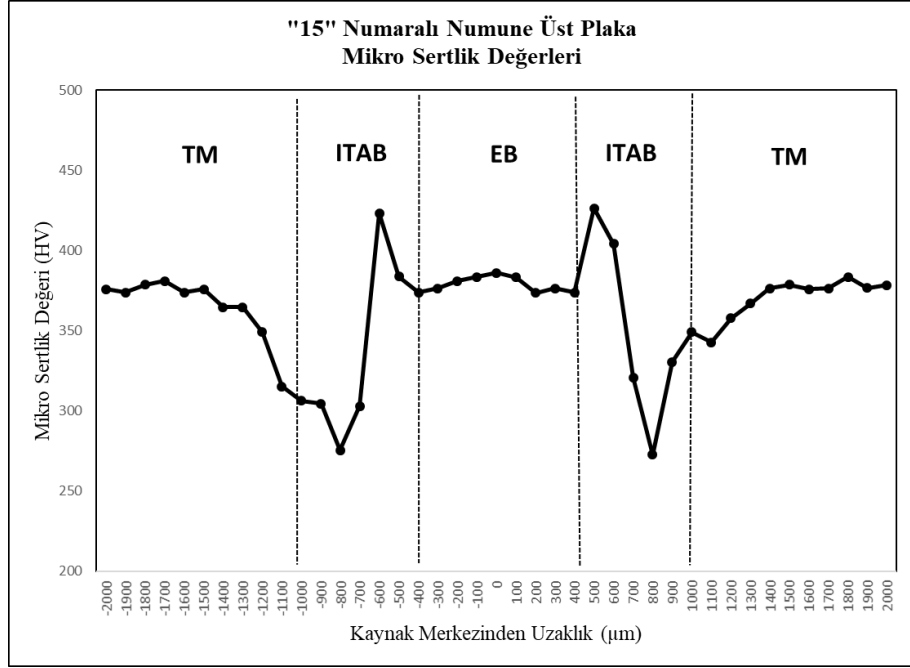
Şekil 4.21. "8" numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



Şekil 4.22. "13" numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



Şekil 4.23. "14" numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi



Şekil 4.24. “15” numaralı numune kaynak bölgesi mikro sertlik değişimi

#### 4.6. Mekanik Dayanım İncelemeleri

Fiber lazer kaynağı ile farklı parametreler kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi yapılmıştır. Kaynak dikişi gerilme bileşenleri, normal gerilme ve kayma gerilmeleridir (Kim ve Park 2012). Çekme testi sonrasında maksimum kayma kuvveti, yüzde uzama değerleri elde edilmiştir; birim (mm) başına taşınabilecek yük hesaplanmıştır (Çizelge 4.2).

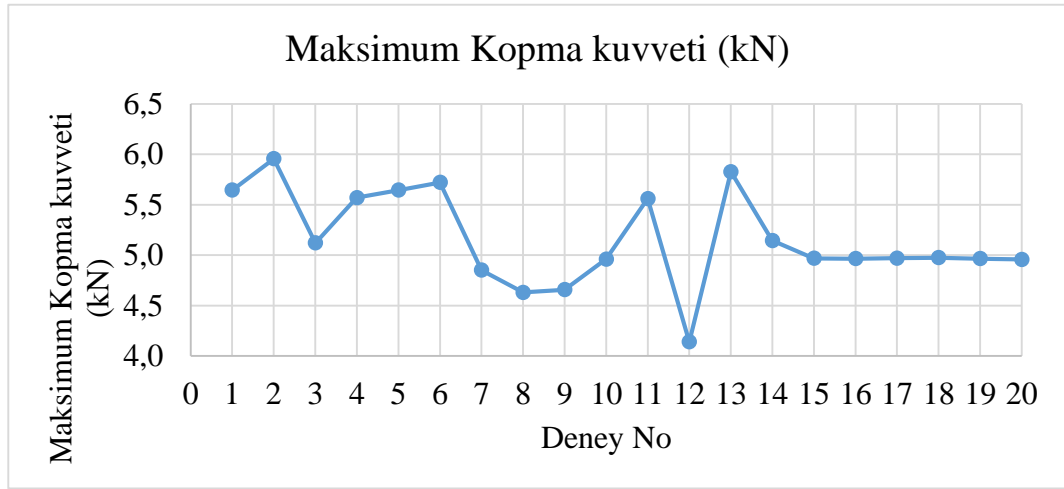
Deneylede genel itibariyle bindirme kaynağı özelinde yüksek kuvvet ve nispeten yüksek sayılabilecek yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. En yüksek kayma kuvveti “2” numaralı numunede 5,9555 kN, en düşük kayma kuvveti “12” numaralı numunede 4,1391 kN olarak elde edilmiştir. EB sertlik artışı sonucu meydana gelen gevrekleşme, maksimum kuvvet değerindeki düşüşün sebebidir. En yüksek yüzde uzama miktarı %0,4250 değeri ile “1” numaralı numunede elde edilmekle birlikte “2” numaralı numunenin yüzde uzaması (%0,4094) da bu değere yakındır. “1” ve “2” numaralı numunelerin kayma kuvveti değerleri arasındaki fark da azdır. En düşük yüzde uzama miktarı “9” ve “12” numaralı numunelerde %0,2797 ve %0,2891 olarak elde edilmiştir.

Yüksek mekanik özelliklere sahip “2” numaralı numune en yüksek ısı girdisine sahiptir (55,79 J/mm). Kullanılan parametreler: lazer gücü 2650W, ilerleme hızı 47,5 mm/s, lazer açısı 75°’dir. Maksimum kayma kuvveti ve yüzde uzama değerlerinin elde edilmesinde lazer gücünün yüksek seviye, ilerleme hızının en düşük seviye, lazer açısının düşük seviyeli olması etkili olmuştur. En düşük ısı girdisine sahip (35,71 J/mm) “12” numaralı numunede ise en düşük mekanik özellikler elde edilmiştir. Lazer gücü 2500 W, ilerleme hızı 70 mm/s, lazer açısı 80° parametreleri ile üretilmiştir. İlerleme hızının yüksek olması ısı girdisini düşürmekte ve bu durum mekanik özellikleri etkilemektedir. Mekanik özellikler üretim parametreleri ve dolayısıyla ısı girdisi ile doğrudan ilişkilidir.

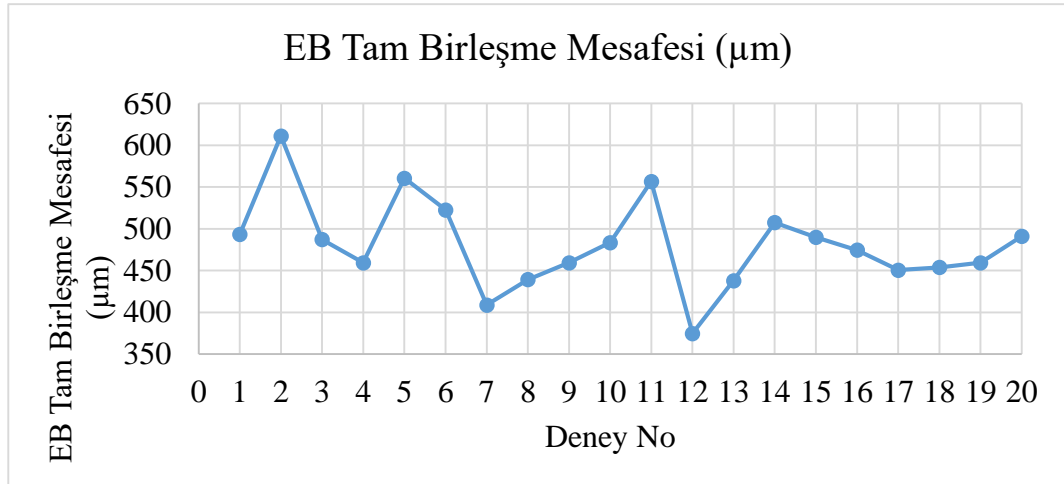
**Çizelge 4.2.** Çekme testi sonrasında elde edilen maksimum kayma kuvveti, birim başına taşınan yük, uzama değerleri

Deney No	Maksimum Kayma Kuvveti (kN)	Birim (mm) başına taşıdığı yük (kg)	Uzama (%)
1	5,6445	45,1562	0,4250
2	5,9555	47,6438	0,4094
3	5,1203	40,9625	0,3500
4	5,5688	44,5500	0,4148
5	5,6438	45,1500	0,3711
6	5,7203	45,7625	0,3953
7	4,8500	38,8000	0,2844
8	4,6297	37,0375	0,3182
9	4,6568	37,2542	0,2797
10	4,9594	39,6750	0,3203
11	5,5594	44,4750	0,3633
12	4,1391	33,1125	0,2891
13	5,8266	46,6125	0,3891
14	5,1443	41,1542	0,2820
15	4,9672	39,7375	0,3273
16	4,9646	39,7166	0,3609
17	4,9695	39,7562	0,3016
18	4,9742	39,7938	0,3477
19	4,9648	39,7188	0,3391
20	4,9568	39,6542	0,3495

Çekme testi sonucunda elde edilen kayma kuvveti, kaynak geometrisinde ölçülmüş olan iki plaka arasındaki EB tam birleşme mesafesi değerleri ile ilişkilendirilmiştir (Çizelge 4.1). İki plaka arasındaki bağlantı mesafesi İngilizcede “bonding” olarak adlandırılmaktadır, kaynak kalitesinde etkin rolü bulunmaktadır (Kouadri-Henni 2017). Çekme testi sonrası elde edilen maksimum kayma kuvveti ve tam birleşme mesafesi değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Şekil 4.25.a ve Şekil 4.25.b grafikleri doğru orantılı olarak artma ve azalma eğiliminde olup, örtüşmektedir.



a)



b)

Şekil 4.25. a) Maksimum kopma kuvveti grafiği, b) EB tam birleşme mesafesi grafiği

#### 4.7. Yanıt Yüzey Metodolojisine Göre Optimizasyon Çalışması

Kaynak parametrelerinin kayma kuvvetine etki oranlarını ve optimum proses parametrelerini belirlemek için Yanıt Yüzey Metodolojisi (Response Surface Method) kullanılarak Minitab programı yardımıyla analiz yapılmıştır (Çizelge 4.3).

Analiz sonucunda elde edilen katsayı, serbestlik derecesi, etki oranı, kareler toplamı, kareler ortalaması, F testi ve P testi değerleri Çizelge 4.3’de bulunmaktadır. Katsayılar, kayma kuvvetinin tahmininde regresyon denkleminin elde edilmesinde kullanılmaktadır. İstatistiksel analizler %95 güven aralığında gerçekleştirildiğinden P-değeri 0,05’den az olduğunda anlamlı sonuçlar elde edilebilir; P-değerinin küçük olması incelenen parametrenin daha etkin olduğunu ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre ilerleme hızı parametresi %48,10 etki oranı ile en etkin parametredir. Lazer açısı parametresi %11,96, lazer gücü parametresi %2,26 etki oranlarına sahiptir. Sırası ile en etkin parametreler ilerleme hızı, lazer açısı ve lazer gücü olarak tespit edilmiştir. Analiz %85,37 güvenilirlik oranına sahiptir.

Yanıt Yüzey Metodolojisine göre yapılan analiz sonucuna göre bir regresyon denklemi elde edilmiştir (Denklem 4.1). Elde edilen denklemde proses parametreleri yerine konularak tahmini kuvvet değerleri hesaplanmış (Çizelge 4.4.) ve deneysel çıktılar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.26). Matematiksel modellenerek elde edilen değerler ile çekme deneyinden elde edilen sonuçlar birbirine yakındır ve tutarlıdır.

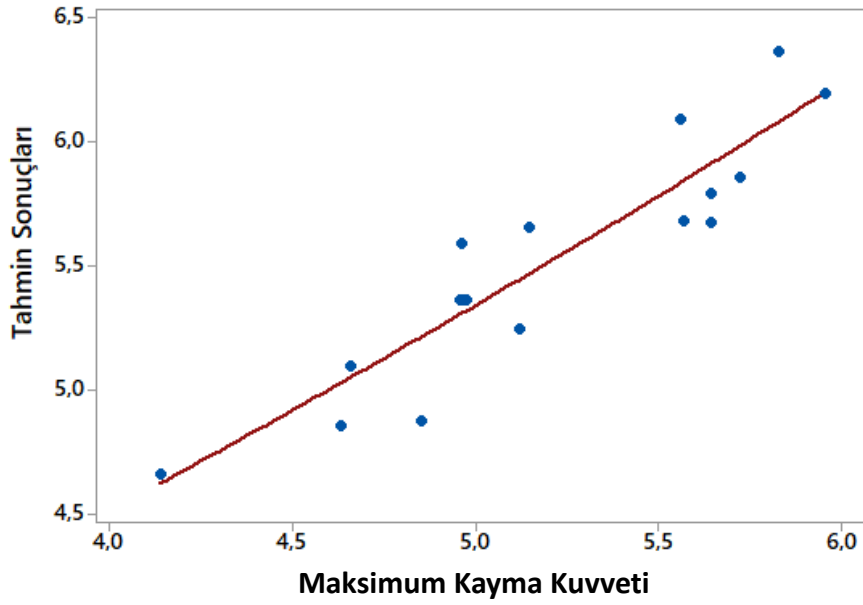
$$\begin{aligned} \text{Maksimum Kayma Kuvveti} = & 2,5 + 0,0149*LG + 0,249*İH - 0,523*LA - \\ & 0,0000002*LG*LG + 0,000069*İH*İH + 0,00652*LA*LA - \\ & 0,000018*LG*İH - 0,000151*LG*LA - 0,00324*İH*LA \end{aligned} \quad (4.1)$$

**Çizelge 4.3.** Yanıt yüzey metodolojisine göre Anaysis of Variance (ANOVA) sonuçları (LG: Lazer Gücü, İH: İlerleme Hızı, LA: Lazer Açısı)

Değişken	Katsayı	Serbestlik Derecesi	Etki Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	5,0324	9	85,37%	3,52322	0,39147	6,48	0,004
LG	0,153	1	2,26%	0,09315	0,09315	1,54	0,2425
İH	-0,704	1	48,10%	1,98524	1,98524	32,89	0,0002
LA	-0,351	1	11,96%	0,49347	0,49347	8,17	0,0170
LG*LG	-0,026	1	0,85%	0,00103	0,00103	0,02	0,8986
İH*İH	0,016	1	0,61%	0,00038	0,00038	0,01	0,9384
LA*LA	0,652	1	16,17%	0,66747	0,66747	11,06	0,0077
LG*İH	-0,08	1	0,08%	0,00318	0,00318	0,05	0,8232
LG*LA	-0,452	1	2,47%	0,10195	0,10195	1,69	0,2229
İH*LA	-0,487	1	2,87%	0,11845	0,11845	1,96	0,1915
Hata		10	14,63%	0,60366	0,06037		
Toplam		19	100,00%				

**Çizelge 4.4.** Tahmini kayma kuvveti ile deneysel çıktılarının karşılaştırılması

Deney No	Tahmini Kayma Kuvveti (kN)	Maksimum Kayma Kuvveti (kN)
1	5,6782	5,6445
2	6,1942	5,9555
3	5,2475	5,1203
4	5,6825	5,5688
5	5,7927	5,6438
6	5,8557	5,7203
7	4,8760	4,8500
8	4,8580	4,6297
9	5,0937	4,6568
10	5,5917	4,9594
11	6,0904	5,5594
12	4,6621	4,1391
13	6,3677	5,8266
14	5,6577	5,1443
15	5,3607	4,9672
16	5,3607	4,9646
17	5,3607	4,9695
18	5,3607	4,9742
19	5,3607	4,9648
20	5,3607	4,9568



**Şekil 4.26.** Tahmini kayma kuvveti ile çekme deneyi sonucundaki deneysel verilerin karşılaştırılması

Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametreleri ikili olarak incelenerek, Sigma Plot programı yardımıyla grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.27’de lazer gücü ve ilerleme hızı, Şekil 4.28’de ilerleme hızı ve lazer açısı, Şekil 4.29’da lazer gücü ve lazer açısı parametreleri arasındaki ilişki yüzey ve kontür grafikleri ile gösterilmiştir. Yüksek lazer gücü (2800 W) ve düşük ilerleme hızında (40 mm/s) ısı girdisinin artmasıyla istenilen kaynak geometrisi değerleri elde edilmektedir; kaynaklanan malzemeler arasında tam penetrasyon gerçekleştiğinden kayma kuvveti artma eğilimindedir (Şekil 4.27). İlerleme hızı ve lazer açısının birbirine göre etkileri incelendiğinde: 40 mm/s ilerleme hızında 70° ve 90° lazer açısı parametrelerinde yüksek kayma kuvveti elde edilmiştir (Şekil 4.28); lazer açısı parametresi özelinde elde edilen bu bilgi, kaynak geometrisi incelemeleri ile tutarlıdır ve birbirini kanıtlar niteliktedir. Üretimde yüksek lazer gücü (2800 W) ve düşük lazer açısı (70°) parametreleri kullanıldığında kayma kuvveti açısından iyi sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 4.29).

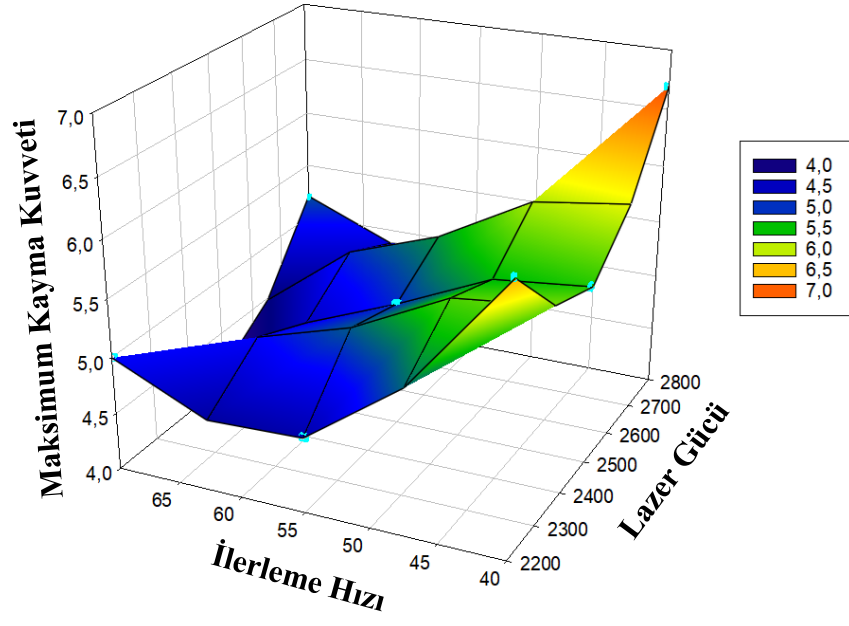
Proses parametreleri optimize edilerek ve uygun ısı girdisi sağlanarak maksimum kuvvet elde edilebilir, kaynaklı bağlantının mekanik özellikleri kontrol edilebilir. Amaç fonksiyonu maksimum kayma kuvveti olmak üzere Minitab Response Optimizer



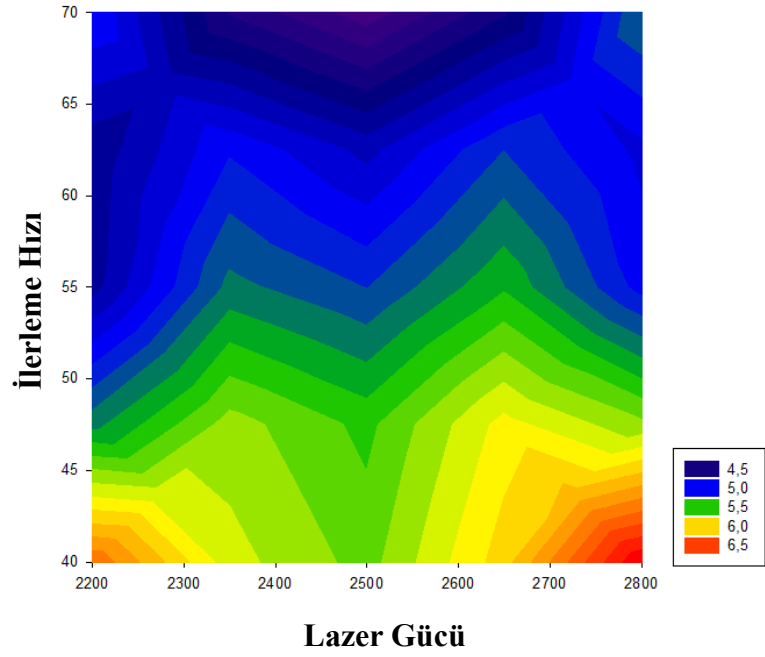
yardımıyla proses parametreleri optimize edilmiştir. Elde edilen optimum parametreler lazer gücü için 2800 W, ilerleme hızı için 40 mm/s, lazer açısı için 70°'dir; bu parametreler ile üretilen numunenin çekme testi sonrası elde edilen maksimum kayma kuvvetinin 6,927 kN olması tahmin edilmektedir (Çizelge 4.5).

**Çizelge 4.5.** Maksimum kayma kuvveti amaç fonksiyonuna göre elde edilen optimum proses parametreleri

Değişken	Değerler
Lazer Gücü	2800 W
İlerleme Hızı	40 mm/s
Lazer Açısı	70 °
Maksimum Kayma Kuvveti	6,927 kN

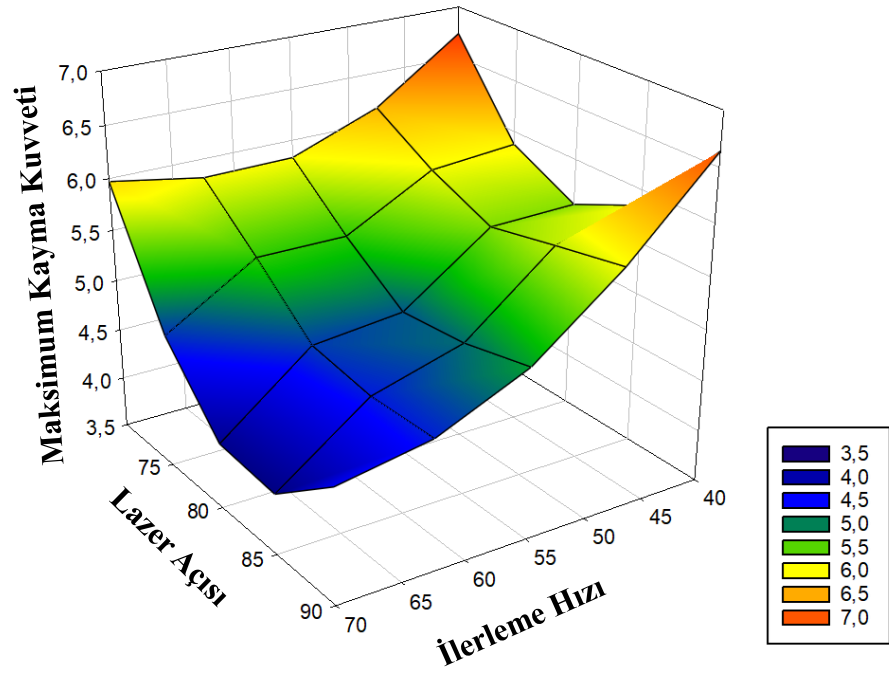


a)

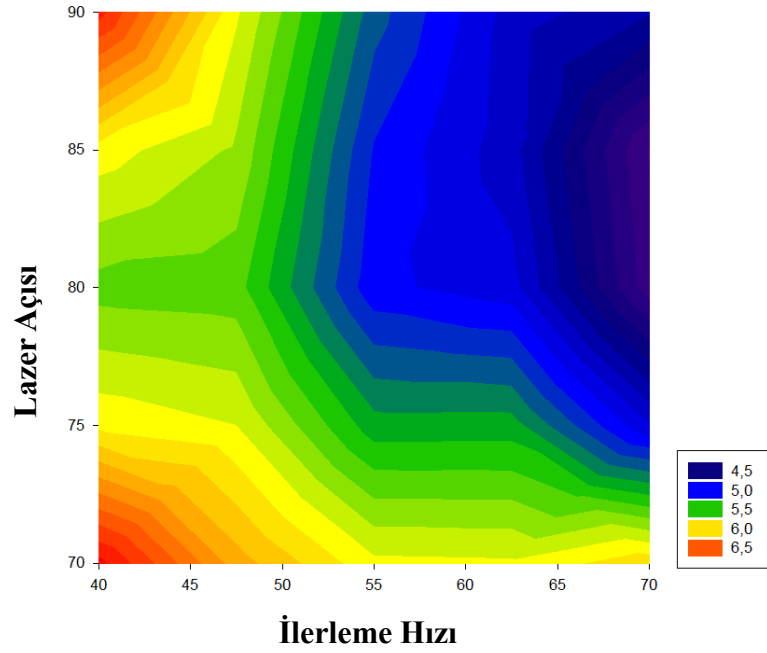


b)

**Şekil 4.27.** a) Lazer gücü ve ilerleme hızı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) Lazer gücü ve ilerleme hızı arasındaki ilişki kontür grafiği

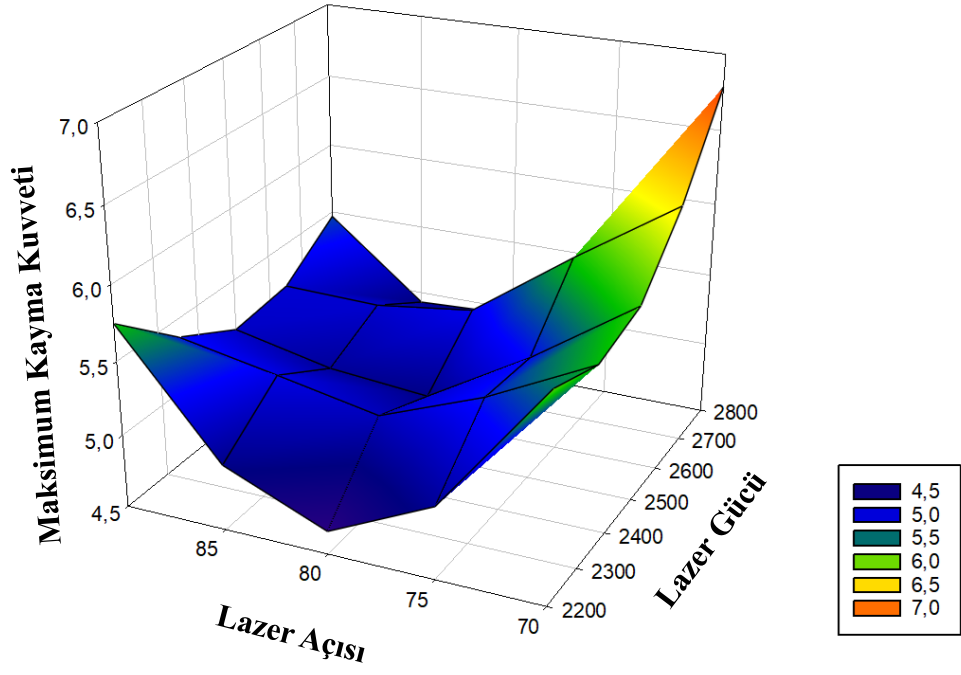


a)

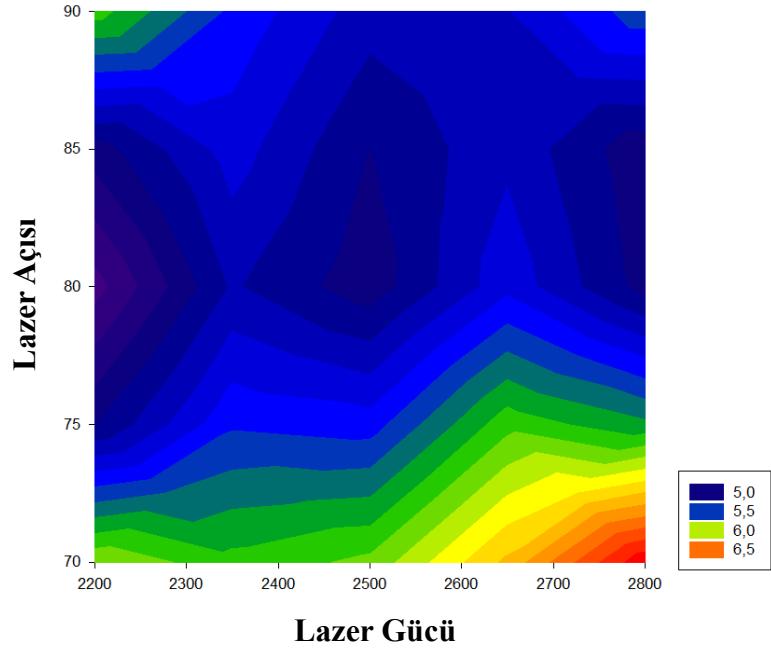


b)

Şekil 4.28. a) İlerleme hızı ve lazer açısı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) İlerleme hızı ve lazer açısı arasındaki ilişki kontür grafiği



a)



b)

Şekil 4.29. a) Lazer gücü ve lazer açısı arasındaki ilişki yüzey grafiği, b) Lazer gücü ve lazer açısı arasındaki ilişki kontür grafiği

#### 4.8. Kırılma Yüzeyi SEM İncelemeleri

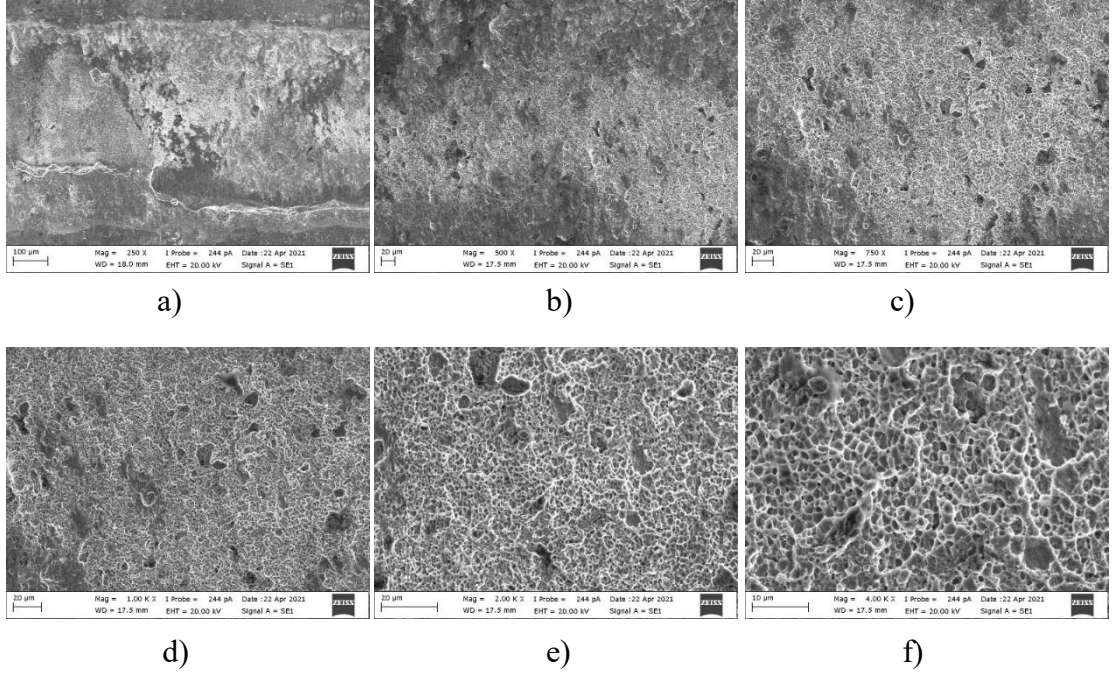
Kırılmanın başladığı yüzeyde stres konsantrasyonunun artmasıyla çatlak ilerlemekte ve bağlantının zayıf olduğu bölgeden kırılma gerçekleşmektedir. Kırılma olayında, dislokasyonların kayması ile plastik deformasyon meydana gelmesi etkilidir (Buddu ve ark. 2015). Kaynağın farklı bölgelerinde gerçekleştiğinden, kırılma ve çatlak mekanizmalarının açıklanması zordur, aşağıda sünek ve gevrek kırılma fraktografileri açıklanmıştır.

İngilizce “dimples” olarak ifade edilen büyük ve sığ çukurlar sünek kırılma göstergesidir. DP1200 çeliğindeki yumuşak yapıli ferritik faz dolayısıyla tipik sünek kırılmayı ifade eden tekdüze dağılmış sığ çukurlar oluşmaktadır, bu çukurlar farklı boyutlarda olabilir. (Bandyopadhyay ve ark. 2016b). Kırılma yüzey morfolojisinde gevrek bölgelerin varlığı “klivaj” kavramıyla açıklanır, zayıf bağlantı ve zayıf tokluk özelliklerinin göstergesidir. Yüksek büyütmelede incelendiğinde çok miktarda yorulma çizgisi ve yarıma sırtları gözlemlenebilir. Tane sınırları ortaya çıkmakta ve taneler arasında gerilme yığılması nedeniyle kırılma gerçekleşmektedir (L. Li ve ark. 2020). Taneleri keserek meydana gelen kırılma transgranüler kırılma olarak adlandırılmaktadır, tane sınırları yüzeylerinin birbirlerinden ayrılması şeklinde oluşmaktadır. Tane sınırları boyunca meydana gelen kırılma ise intergranüler kırılma olarak adlandırılmaktadır, sünek ya da gevrek olabilir (Datta ve ark. 2020). Temperlenmiş martenzit fazı dolayısıyla mikro gözenekler çekirdeklenerek büyüme eğilimindedir; çatlak bu sert faz içerisinde ilerlemekte ve kırılma kolaylıkla gerçekleşmektedir (Xu ve ark. 2012), (Buddu ve ark. 2015), (Xu ve ark. 2012).

Temperlenmiş martenzit ve ferrit fazları dolayısıyla sünek ve gevrek yapı, yerel bölgelerde bir arada bulunabilir. Ferritik yapı sünek olduğundan plastik deformasyonu sürdürebilir ancak martenzitik yapı sert olduğundan daha az deformasyona uğrayacaktır. Bağlantının kuvvetlendirilebilmesi, süneklik kaybının giderilebilmesi için kalıntı gerilmeyi giderecek ve mekanik özellikleri iyileştirecek yöntemler kullanılmalıdır.

Çekme testi sonrasında, lazer kaynaklı numunelerin (“1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler) kırılma yüzeyleri 250, 500, 750, 1000, 2000, 4000 büyütme altında SEM cihazında incelenmiştir ve yorumlanmıştır. Kırılmalar EB ve ITAB’tan gerçekleşmiştir.

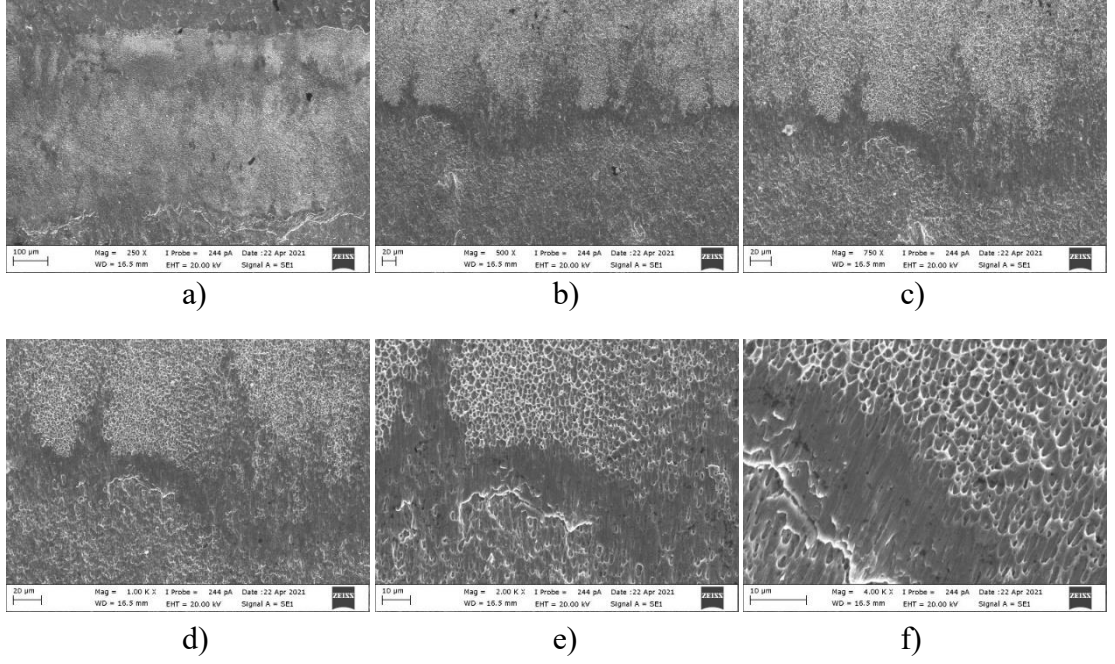
“1” numaralı numune için kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.30’da bulunmaktadır. Bu numunede sünek ve gevrek kırılma morfolojileri bir arada gözlemlenmektedir. Nispeten süneklik daha fazla olmakla birlikte gevrek kırılma eğilimi de bulunmaktadır. Şekil 4.30.f ile gösterilen 4000 büyütme altındaki görüntüde, sünek kırılmayı temsil eden büyük ve sığ çukurlar (dimples) gözlemlenmektedir, ayrıca çukurların kenarlarındaki beyaz renkli bölgeler gerilme yığılmasını ifade etmektedir. 49,47 J/mm ısı girdisine sahip numunede martenzit yüksek sertliği nedeniyle gevrek kırılma etkileri ile birlikte, ferritin süneklik özelliğinden kaynaklanan büyük ve kaba çukurcuklar da oluşmuştur. Tanelerin deformasyonu ve mikro boşlukların (micro void) oluşumu ile başlayan çatlak, ince karbür çökeltileri ile de ilişkilendirilebilir (Saha ve ark. 2014b).



**Şekil 4.30.** “1” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

“2” numaralı numunede sünek ve gevrek kırılma mekanizmaları birlikte bulunmaktadır, kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Isı girdisi kırılma modunu ve kırılma morfolojisini etkilemektedir. Yüksek lazer gücü parametresi sayesinde yüksek ısı girdisine (55,79 J/mm) sahip olan “2” nolu numunede “1” nolu numuneye kıyasla gevrekliğin artmış olduğu Şekil 4.31.e-f’de klivaj düzlemler ile net olarak gözlenmektedir. Yüksek ısı girdisi ile martenzit yapısının daha etkin olması ile yüksek sertlik değerleri elde edilmekte ve gevreklik artmaktadır; daha düşük tokluk özelliklerine sahiptir. Sünek kırılmanın gerçekleştiği bölgelerde ise daha küçük boyutlu, ince ve sığ çukurlar bulunmaktadır.

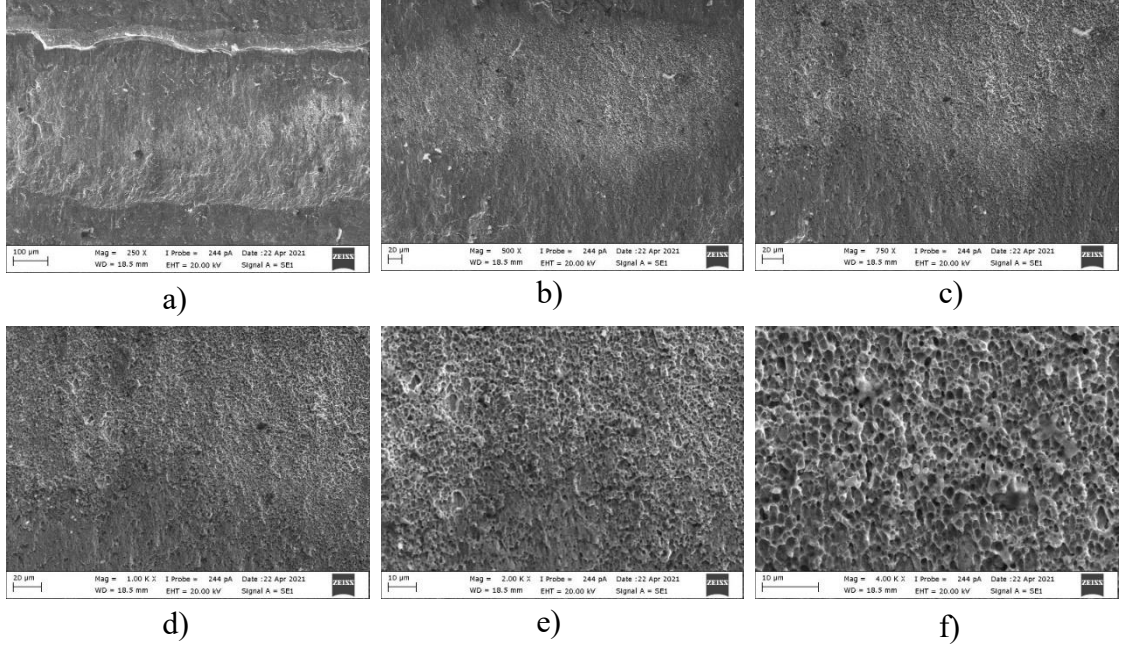
SEM görüntülerinde yüzey morfolojisi incelendiğinde genel olarak üst tarafta sünek yapı, alt tarafta gevrek yapı oluşumları mevcuttur, Şekil 4.31.c-f arasında gözlemlenmektedir. EB de kapsayacak şekilde KT-ITAB bölgesinden kırılma gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.31.** “2” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

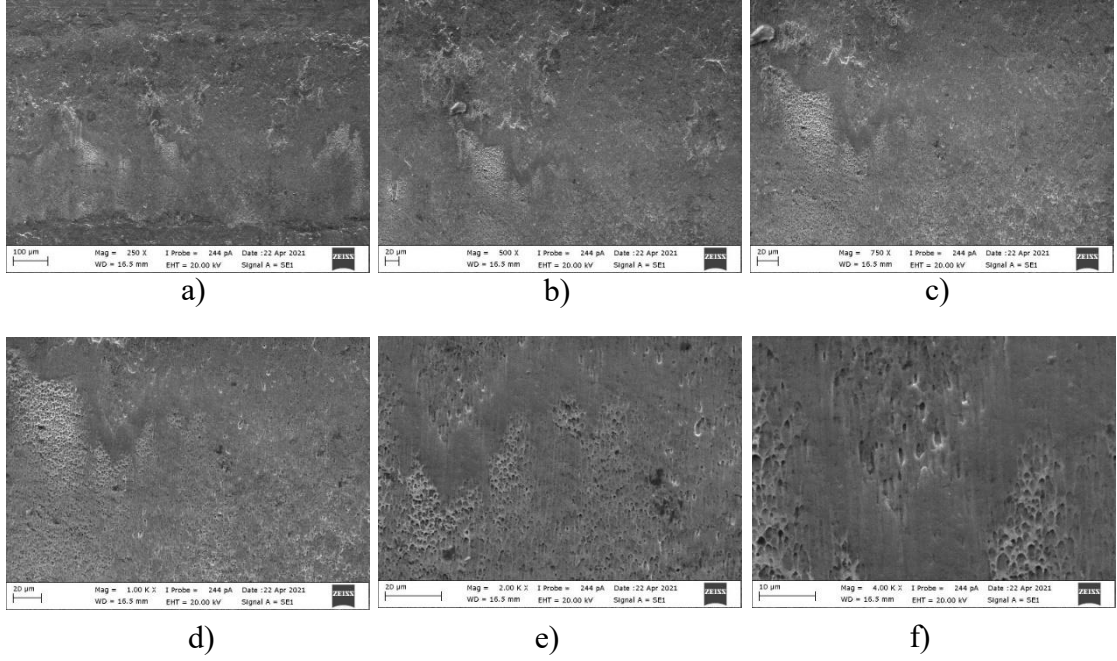
“3” numaralı numunenin kırılma yüzeyi, tipik sünek çukur morfolojisi göstermektedir (Şekil 4.32): çukurlar küçük ve sıg yapıda olduğundan gerilim yığılımı dar bir alanda düşük uzamaya sebep olmuştur, yüzde uzama daha düşüktür. Isı girdisinin (37,60 J/mm) “1” ve “2” numaralı numuneye göre daha düşük olması bu durumda etkilidir. Kırılma “b” bölgesi olarak tanımlanan İnce Taneli ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir, sünek yapılı çukurların çok küçük taneli olması ile ilişkilendirilebilir (intergranüler kırılma).





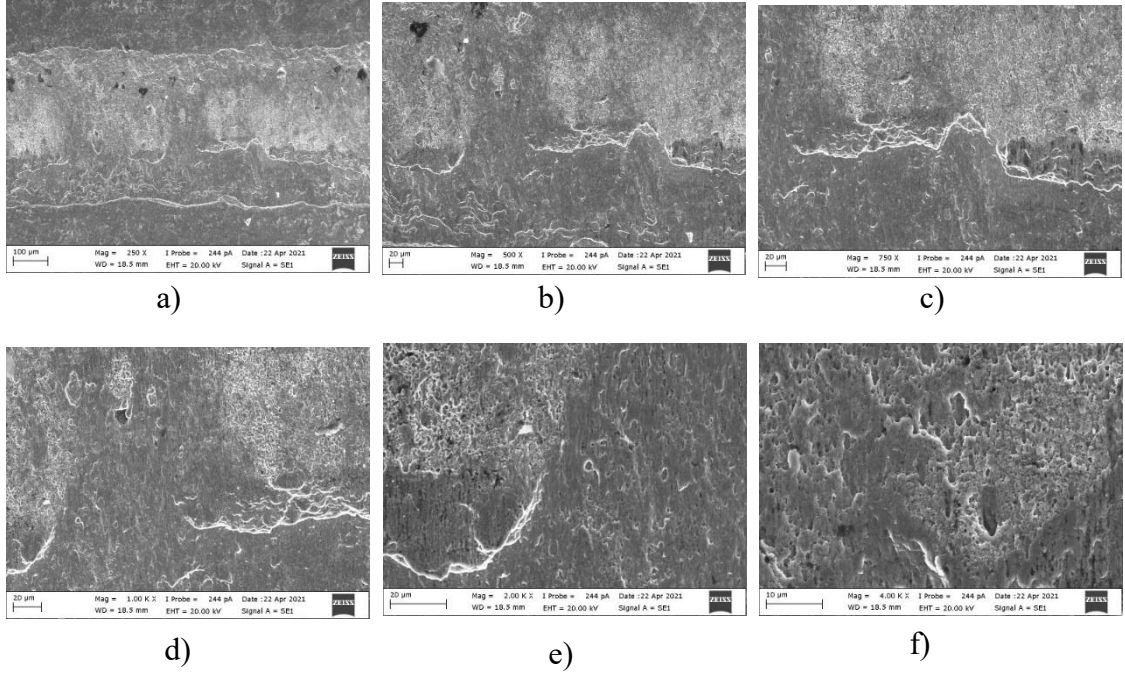
**Şekil 4.32.** “3” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

“4” numaralı numunenin kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 4.33 ‘de bulunmaktadır. İncelenen yüzeylerde gevrek kırılma etkileri vardır; yerel olarak küçük bölgelerde çukur oluşumları gözlemlense de klivaj kırılma oldukça belirgindir. Klivaj kırılmaların kaynak EB’den gerçekleştiği yorumu yapılabilir.



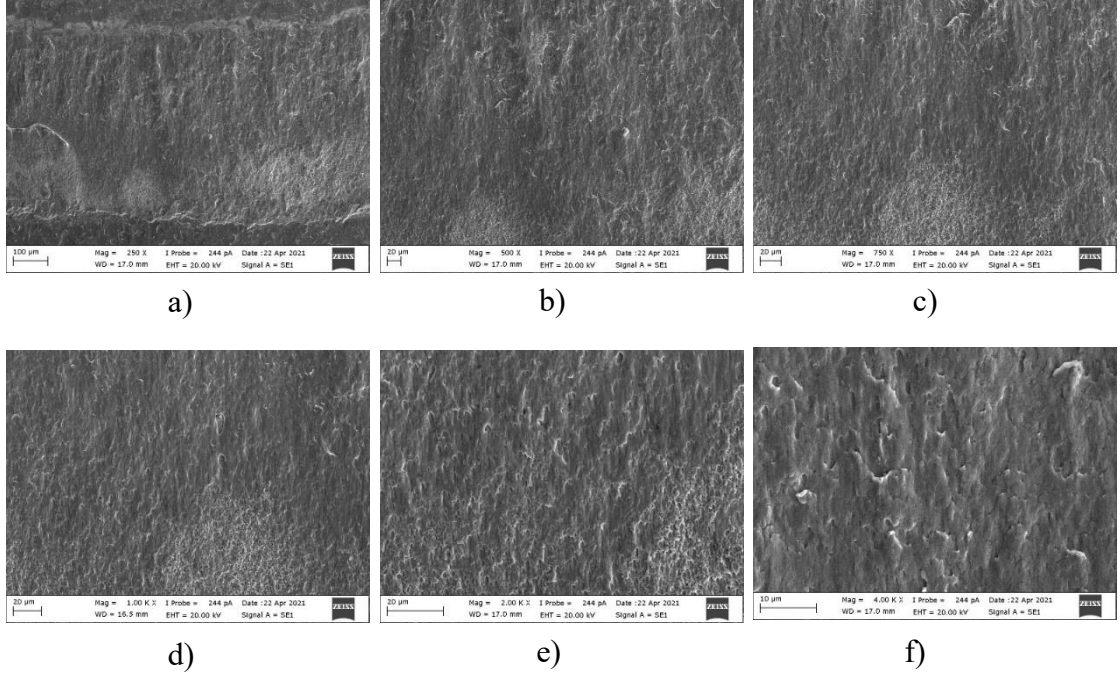
**Şekil 4.33.** “4” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

“8” numaralı numunede gevrekliğin kanıtı olan klivaj kırılmaları yoğundur (Şekil 4.34). Tane sınırlarından gerilme yığılması nedeniyle kopma gerçekleştiğinde oluşan çukurlar oldukça küçük boyutludur, bu numunede olduğu gibi geniş bir alana yayılan seyrek çukurlar sünekliğin zayıf olduğunun göstergesidir. “4” numaralı numuneye kıyasla gevreklik artmıştır; kırılma kaynak merkezinden gerçekleşmiştir. “4” ve “8” numaralı numunelerin lazer gücü ve ilerleme hızı parametreleri sabittir; 75 ° ve 85° lazer açısı parametreleri özelinde değerlendirildiğinde lazer açısı artışı ile gevreklik artmaktadır.



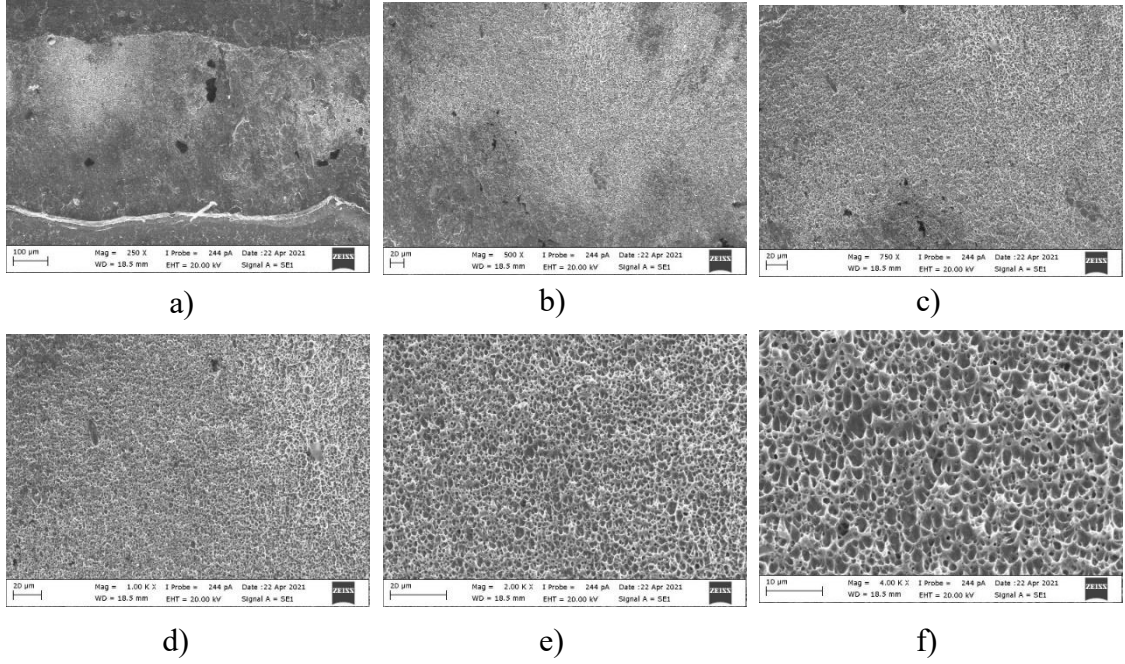
**Şekil 4.34.** “8” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

“13” numaralı numunede klivaj kırılmaların yoğunluğu oldukça fazladır. Sünekliğin göstergesi çukurlu ve boşluklu oluşumlar bulunmamaktadır; zayıf süneklik ve gevrekliğin göstergesi klivaj kırılmaları mevcuttur, Şekil 4.35’de gösterilmiştir. Düz bir yüzey üzerinde klivaj kırılmaları dolayısıyla oluşan bölünme sırtları gözlemlenebilmektedir. Düşük lazer açısı parametresi nedeniyle elde edilen yüksek sertlik değerleri, yüksek gevreklik ve klivaj oluşumları ile ilişkilendirilebilir; martenzit yapısının etkin hale gelerek gevrekliği arttırdığı söylenebilir. Ayrıca düşük lazer açısı (70°) parametresinin kullanımı ile kırılma bölgesi kaynak merkezinden (EB) gerçekleşmiştir.



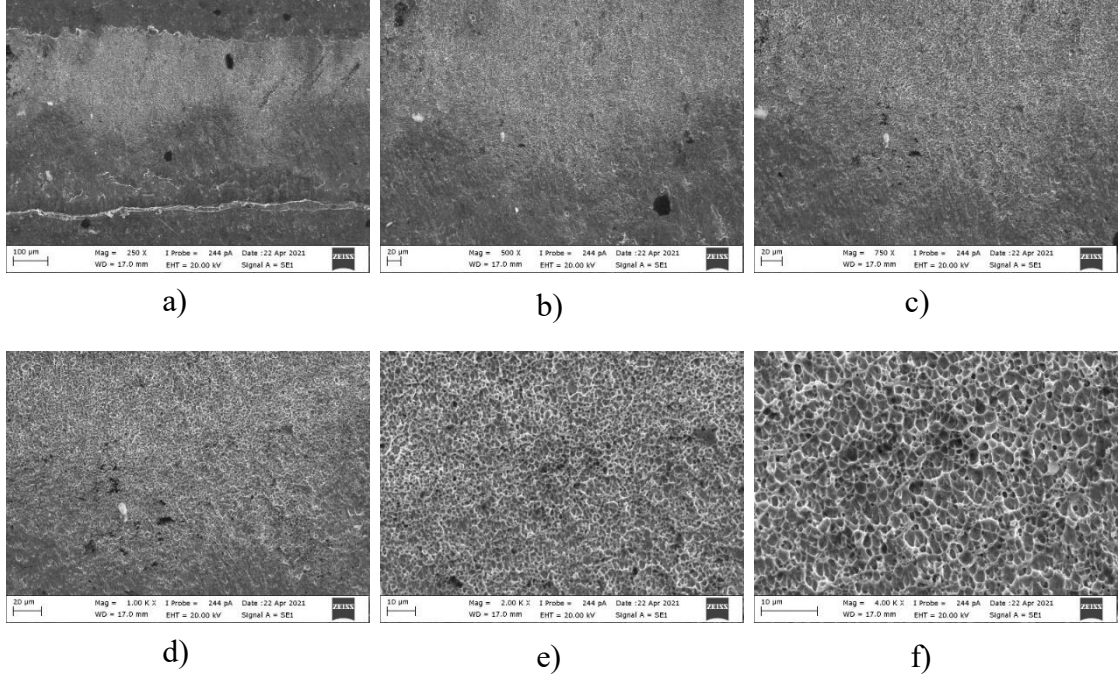
**Şekil 4.35.** “13” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

“14” numaralı numune için kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.36’de bulunmaktadır. Sünek kırılma morfolojisine sahiptir, oluşan çukurlar küçük boyutludur, Şekil 4.36.e-f’de net olarak görülebilmektedir. Tane sınırlarında gerilme yığılmaları nedeniyle düşük uzama gerçekleşmiştir. ITAB’ta, “b” olarak adlandırılan İnce Taneli ITAB’dan kırılma gerçekleşmiştir, mikro yapının çok ince taneli olması sebebiyle bu yorum yapılabilir. Şekil 4.36.a’da gözlemlenen siyah renkli oluşumlar gözenek olarak tanımlanabilir, kaynak işlemlerinde EB içerisinde gözeneklere rastlanmaktadır.



**Şekil 4.36.** “14” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

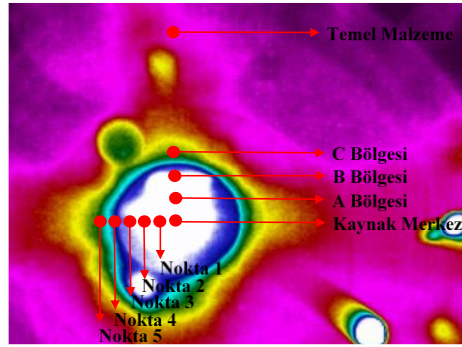
“15” numaralı numunede oluşan çukurlar sünek kırılmanın kanıtıdır (Şekil 4.37), “14” numaralı numune ile kıyaslandığında çukur boyutları daha küçüktür ve ince tanelidir. Büyük çukurlardan ziyade daha ince çukur morfolojileri, tokluğun biraz daha yüksek olduğunun göstergesidir. Kırılma ITAB bölgesi içerisinde “b” bölgelesini içerisine alacak şekilde İnce Taneli ITAB bölgelesinden gerçekleşmiştir. Lazer açısı parametresinin yüksek olması ( $90^\circ$ ) kırılma bölgesinin kaynak merkezinden uzaklaşmasına ve ITAB bölgesi içerisinde kalmasına neden olmaktadır. Şekil 4.37.a-b’de gözlemlenen küresel ve elips şeklinde siyah renkli oluşumlar gözenek olarak yorumlanmıştır.



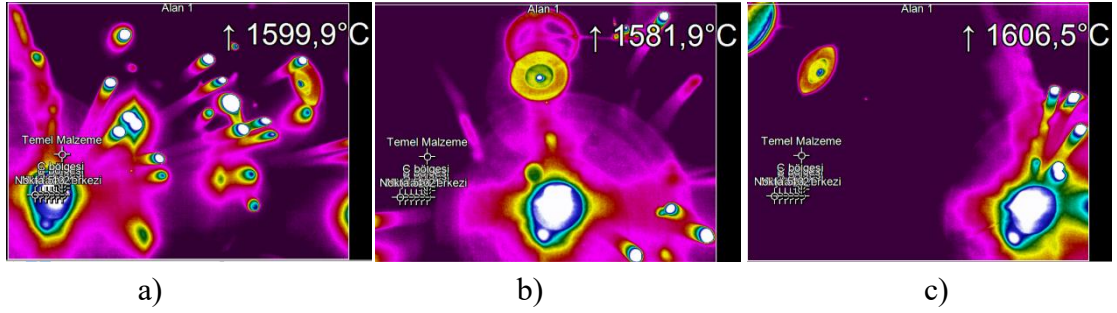
Şekil 4.37. “15” numaralı numune kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

#### 4.9. Termal Analiz

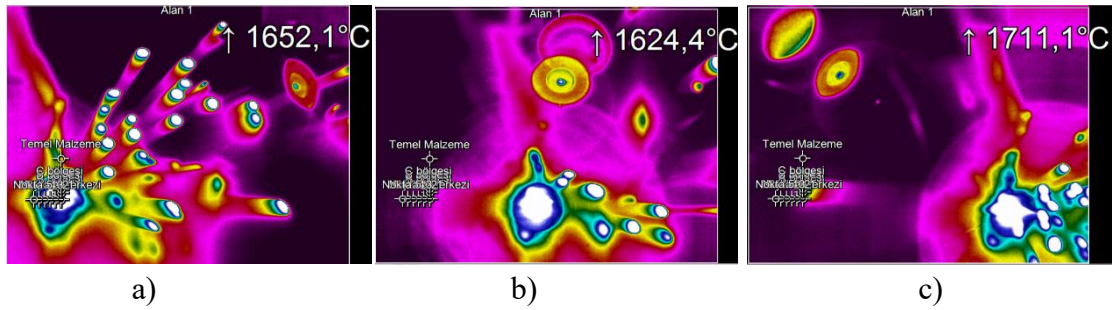
Lazer kaynak işlemi sırasında tüm deneyler için termal kamera ile görüntü alınmıştır; kaynak havuzunda ve temel malzemede belirlenen noktalar için termal analiz yapılmıştır. Kaynak havuzu içerisinde kaynak merkezi, A noktası, B noktası, C noktası, temel malzeme bölgeleri ve kaynak ilerleme yönünün tersinde 5 adet nokta belirlenmiştir (Şekil 4.38). “1”, “2” ve “3” numaralı deneyler için termal kamera görüntüleri sırasıyla Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’da bulunmaktadır.



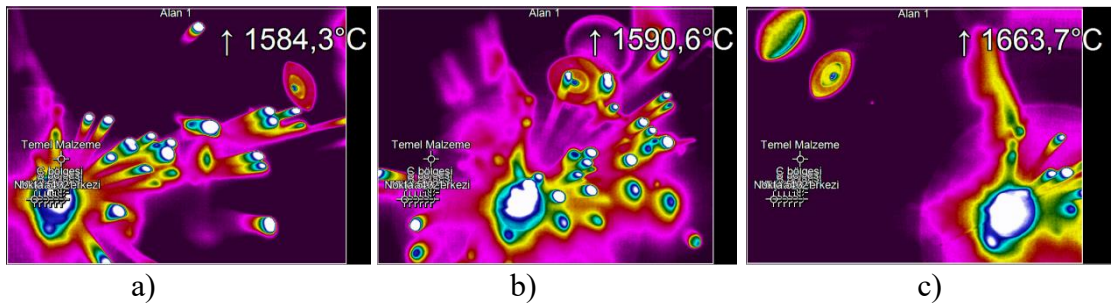
Şekil 4.38. Termal kamera analizi için belirlenen noktalar



**Şekil 4.39.** “1” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi



**Şekil 4.40.** “2” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi



**Şekil 4.41.** “3” numaralı deneyde lazer kaynak sırasında belirlenen alanda yüzey bölgelerinin sıcaklık değişimi

Maksimum sıcaklık tüm numunelerde farklılık göstermektedir. Isı girdisi arttıkça ulaşılan tepe sıcaklığı artmaktadır. Tüm deneylerde elde edilen maksimum sıcaklıklar kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme için Çizelge 4.6’da kaynak ilerleme yönüne ters yöndeki Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 için

Çizelge 4.7’de gösterilmektedir. Kaynak yüzeyinde elde edilen sıcaklıklar şöyledir: kaynak merkezinde yüksek ısı girdisi nedeniyle maksimum sıcaklığa ulaşılrken kaynak merkezinden uzaklaştıkça A, B ve C noktalarında sıcaklık düşmektedir, temel malzeme de ise en düşük sıcaklık elde edilmektedir. Elde edilen en yüksek sıcaklık 1896 °C değerindedir. Nokta 1- Nokta 5 ise kaynak doğrultusunda olması dolayısıyla maksimum sıcaklıklar numune bazında değışkenlik göstermemekle birlikte parametrelere bağılı olarak ısı girdisi arttıkça artmaktadır. “1”, “2”, “3” numaralı numuneler için süreye bağılı sıcaklık grafikleri Şekil 4.42-Şekil 4.47 arasında yer almaktadır. “4-20” numuneleri için sıcaklık zaman grafikleri EKLER bölümünde EK 3-EK 19’da bulunmaktadır.



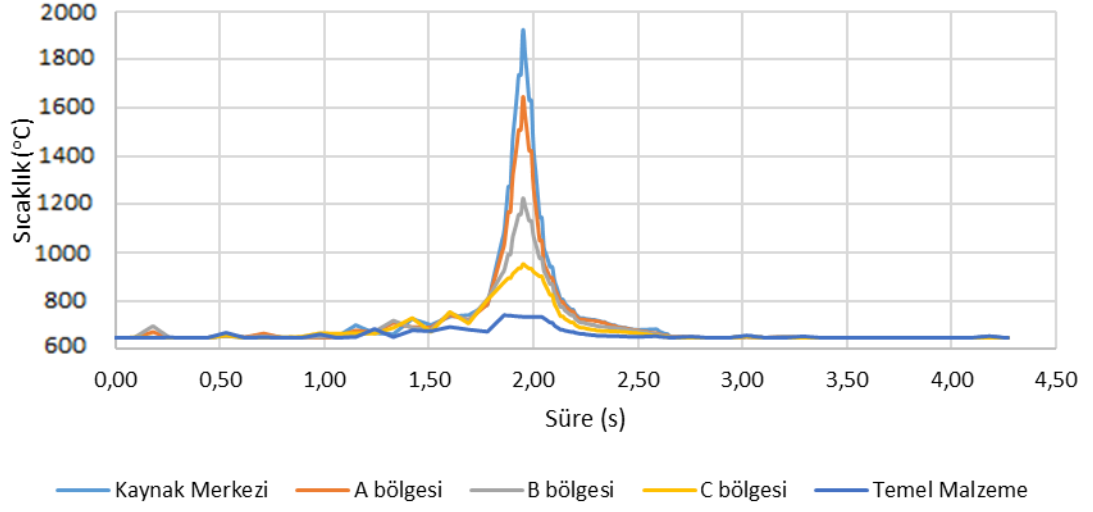
**Çizelge 4.6.** Kaynak yüzeyinde kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme için elde edilen maksimum sıcaklıklar

Deney No	Kaynak Merkezi	A bölgesi	B bölgesi	C bölgesi	Temel Malzeme
1	1896,5	1722,3	1459,9	1291	1156,6
2	1890,8	1709,6	1476,4	1377,7	1185,9
3	1691,6	1585,5	1364	1276,4	1138,6
4	1795,7	1575,9	1445	1266,8	1170
5	1677,9	1552,2	1443,4	1347,2	1158,4
6	1638	1536,6	1447,2	1297	1142,8
7	1565,9	1458,2	1332,6	1267,1	1129,2
8	1583,7	1396,7	1254,5	1221,9	1148,1
9	1729,4	1557,9	1322,3	1228,2	1165
10	1683,6	1570,1	1332,1	1221	1149,4
11	1780,6	1592,3	1366,4	1237,4	1151
12	1518,6	1407,5	1271	1215,4	1157,8
13	1662,1	1591,4	1465,2	1231,1	1151,6
14	1644,4	1644,8	1468,2	1214,6	1160,6
15	1740,8	1552,8	1319,3	1225	1157,2
16	1596,3	1480,9	1316,8	1219,1	1143,5
17	1676	1513,05	1317,3	1216,55	1142,2
18	1755,7	1545,2	1317,8	1214	1140,9
19	1807,9	1612,2	1334,1	1219,3	1163,3
20	1769,3	1447,8	1304,3	1224,5	1145,9

**Çizelge 4.7.** Kaynak yüzeyinde Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 için elde edilen maksimum sıcaklıklar

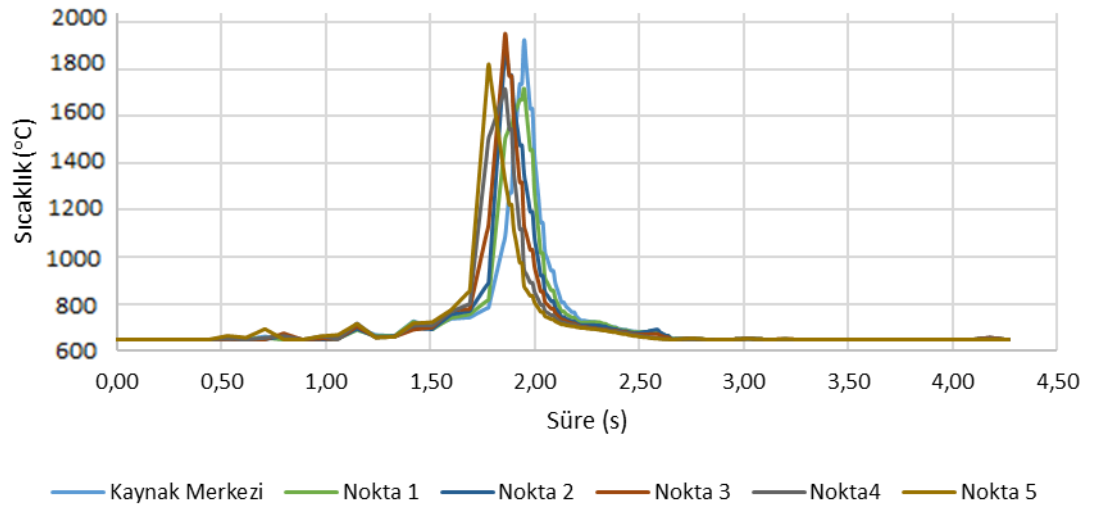
Deney No	Nokta 1	Nokta 2	Nokta 3	Nokta 4	Nokta 5
1	1769,2	1879,4	1915,3	1768,2	1834,2
2	1708,7	1894,4	1803,1	1846,8	1843,5
3	1578,6	1721	1782,5	1712,4	1554,1
4	1746,7	1601,8	1758,4	1825,7	1778,5
5	1604,3	1654,7	1603,8	1574	1669,9
6	1684,5	1682,5	1589,7	1664,1	1542,9
7	1572,8	1467,7	1553,5	1574,6	1483,6
8	1609,7	1699,2	1705,2	1588,4	1600,2
9	1559,9	1729,9	1777,1	1667,5	1643,3
10	1780,6	1755,3	1600,4	1781,7	1824,2
11	1830,3	1883,6	1713,5	1893,6	1851,3
12	1566,4	1645,3	1664,8	1598,8	1477,1
13	1553,1	1620,5	1526,3	1600,8	1560
14	1548,7	1663,4	1497,7	1597,7	1509,7
15	1576,5	1738,8	1786,1	1693,2	1632,5
16	1696,8	1709,9	1616,5	1683,9	1785,7
17	1733,45	1667,2	1654,9	1730,9	1753,75
18	1770,1	1624,5	1693,3	1777,9	1721,8
19	1774,4	1587,2	1728,7	1773,6	1668,1
20	1706	1778,4	1702,2	1603,4	1749,8

### "1" Numaralı Numune Termal Analiz



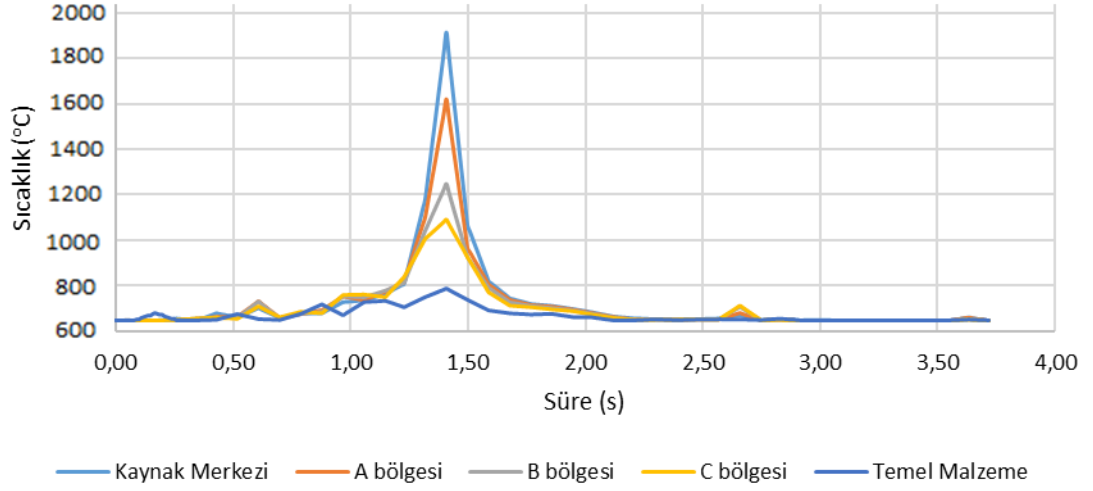
Şekil 4.42. "1" numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme)

### "1" Numaralı Numune Termal Analiz



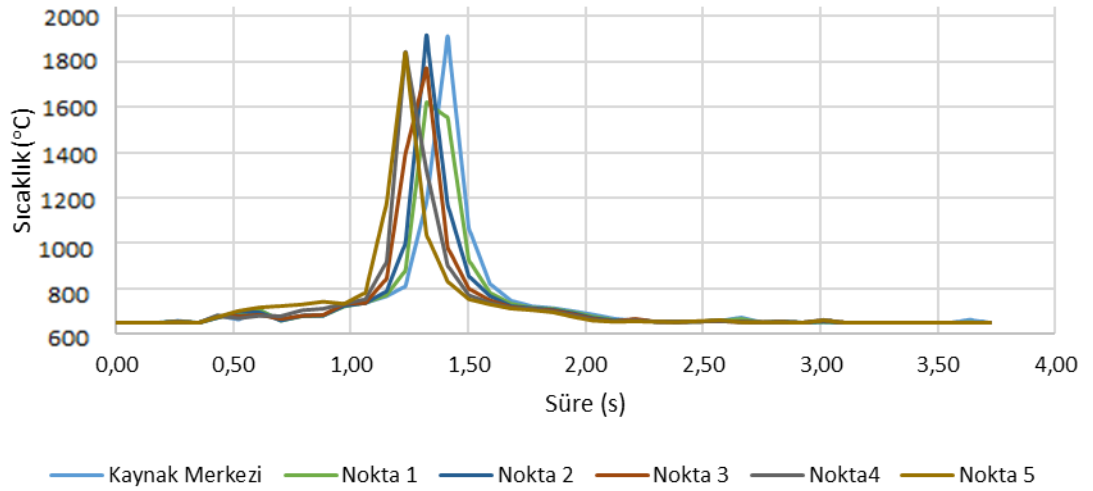
Şekil 4.43. "1" numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5)

## "2" Numaralı Numune Termal Analiz



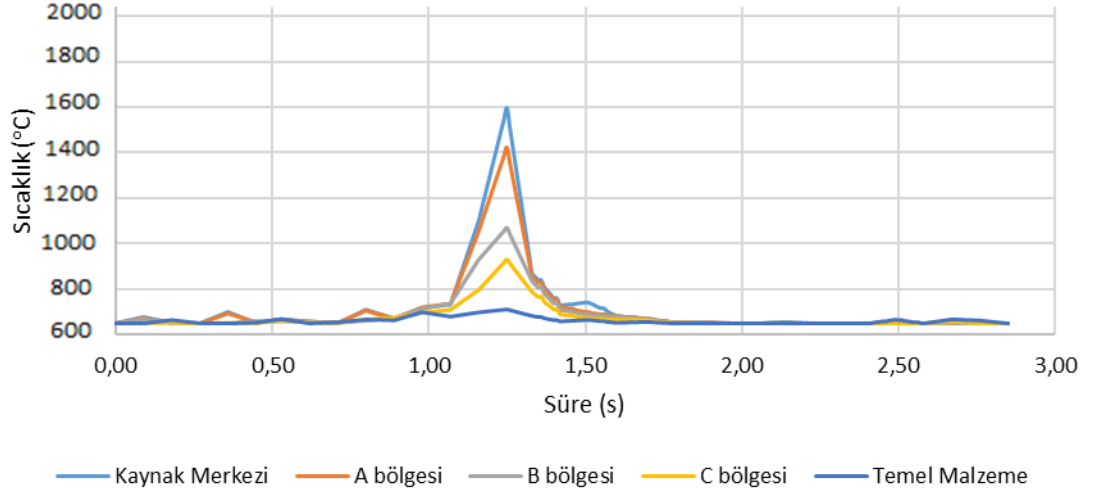
**Şekil 4.44.** “2” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme)

## "2" Numaralı Numune Termal Analiz



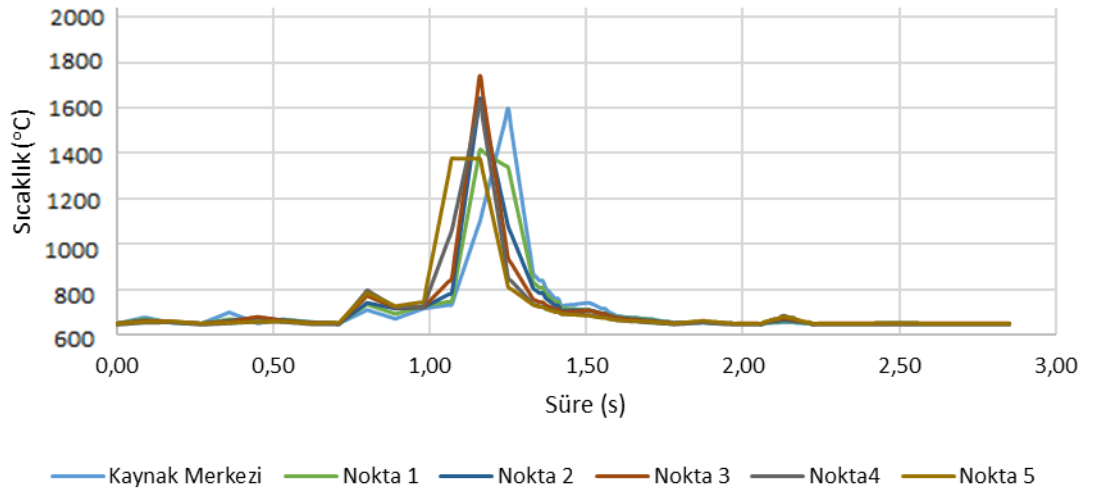
**Şekil 4.45.** “2” numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5)

### "3" Numaralı Numune Termal Analiz



Şekil 4.46. "3" numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme)

### "3" Numaralı Numune Termal Analiz



Şekil 4.47. "3" numaralı numune belirlenen noktalar için termal çevrim grafiği (kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5)

Isı girdisini etkileyen önemli parametreler lazer gücü ve ilerleme hızıdır, lazer açısına bağlı olarak da termal döngüler değişkenlik göstermektedir. Çeliğin ergimesi ve katılaşması sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve katı hal faz dönüşümleri soğuma hızı ile ilişkilendirilmektedir (Piekarska ve Kubiak 2013). Termal analizde elde edilen sıcaklık dağılımına göre maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık arası farkın bu sıcaklıklar arasında geçen süreye oranlanmasıyla soğuma hızları hesaplanmıştır (Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9).

**Çizelge 4.8.** Deney numunelerinin hesaplanan soğuma hızı değerleri (kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme)

Deney No	Isı Girdisi (J/mm)	Kaynak Merkezi (°C/s)	A bölgesi (°C/s)	B bölgesi (°C/s)	C bölgesi (°C/s)	Temel malzeme (°C/s)
1	49,47	7,90	6,18	3,57	2,18	0,50
2	55,79	6,25	4,82	3,24	2,39	0,76
3	37,60	10,84	8,90	4,84	3,31	0,95
4	42,40	9,75	6,67	4,84	2,34	0,83
5	49,47	9,73	4,87	3,70	2,47	0,82
6	55,79	8,01	4,49	3,58	2,11	0,54
7	37,60	10,96	8,07	5,25	3,77	0,83
8	42,40	9,74	7,28	3,79	3,13	0,65
9	40,00	10,14	7,64	3,71	2,14	0,55
10	50,91	7,52	5,01	4,45	2,73	0,36
11	62,50	5,08	4,40	3,90	2,27	0,25
12	35,71	11,45	7,89	4,39	2,97	0,58
13	45,45	8,76	7,00	5,49	2,43	0,19
14	45,45	7,37	5,82	3,94	1,23	0,76
15	45,45	8,75	6,81	4,46	2,55	0,48
16	45,45	8,22	6,10	4,33	2,36	0,44
17	45,45	8,45	6,82	4,26	2,15	0,48
18	45,45	8,68	7,53	4,18	1,94	0,51
19	45,45	8,55	7,39	4,29	2,19	0,68
20	45,45	8,15	7,98	4,61	3,15	0,79

**Çizelge 4.9.** Deney numunelerinin hesaplanan soğuma hızı değerleri (Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5)

Deney No	Isı Girdisi (J/mm)	Nokta 1 (°C/s)	Nokta 2 (°C/s)	Nokta 3 (°C/s)	Nokta 4 (°C/s)	Nokta 5 (°C/s)
1	49,47	6,64	7,26	7,59	6,22	6,44
2	55,79	4,55	5,94	5,26	5,32	5,30
3	37,60	4,48	5,82	6,39	5,74	4,01
4	42,40	9,06	6,44	8,44	9,31	8,70
5	49,47	7,79	8,56	7,12	6,59	7,31
6	55,79	7,84	7,46	6,59	7,00	6,69
7	37,60	9,55	8,96	9,88	9,11	8,85
8	42,40	8,76	8,65	7,77	7,31	7,59
9	40,00	8,97	9,55	9,26	8,16	7,08
10	50,91	6,90	7,85	7,29	6,77	6,57
11	62,50	4,90	5,56	4,05	5,07	4,85
12	35,71	9,27	10,37	10,85	10,59	9,39
13	45,45	7,25	8,03	8,97	7,80	7,33
14	45,45	6,23	6,57	5,64	5,80	5,38
15	45,45	7,32	7,33	8,44	8,89	7,07
16	45,45	7,42	7,40	7,62	7,98	7,37
17	45,45	7,62	6,76	6,98	7,61	7,01
18	45,45	7,81	6,12	6,34	7,25	6,65
19	45,45	7,93	8,28	8,65	7,48	7,67
20	45,45	7,48	7,31	7,71	8,33	7,17

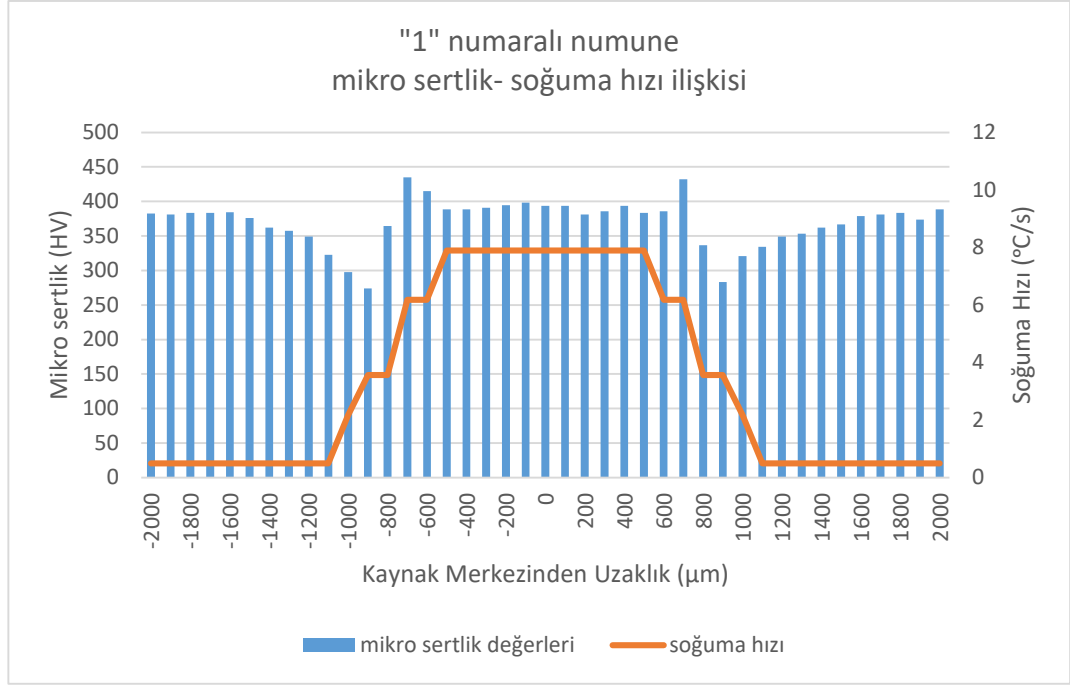
Sıcaklık dağılımı, proses parametrelerine bağlı olarak ısı girdisine göre değişmektedir ve bu durum soğuma hızını etkilemektedir (Zhang ve ark. 2021). Lazer gücü artışı ve ilerleme hızı düşüşü ile ısı girdisi artmakta, kaynak havuzu genişlemektedir. Sıcaklık gradyeni daha geniş alana yayıldığından soğuma yavaş gerçekleşir ve soğuma hızı düşüktür: örneğin yüksek ısı girdisine sahip “2” ve “11” numuneleri kaynak merkezinde 6,25 °C/s ve 5,08 °C/s soğuma hızlarına sahiptir. Düşük ısı girdisinde ise yüksek soğuma hızları gözlemlenmektedir: örneğin düşük ısı girdisine sahip “3” ve “7” numaralı numunelerde kaynak merkezinde soğuma hızları 10,84 °C/s ve 10,96 °C/s’dir.

Numune bazında soğuma hızları incelendiğinde; aynı numunede (ısı girdisi sabit iken) kaynak merkezinde yüksek sıcaklık gradyeni nedeniyle hızlı katılma gerçekleşirken, kaynak merkezinden uzaklaştıkça soğuma hızı azalmaktadır. Kaynak merkezinden

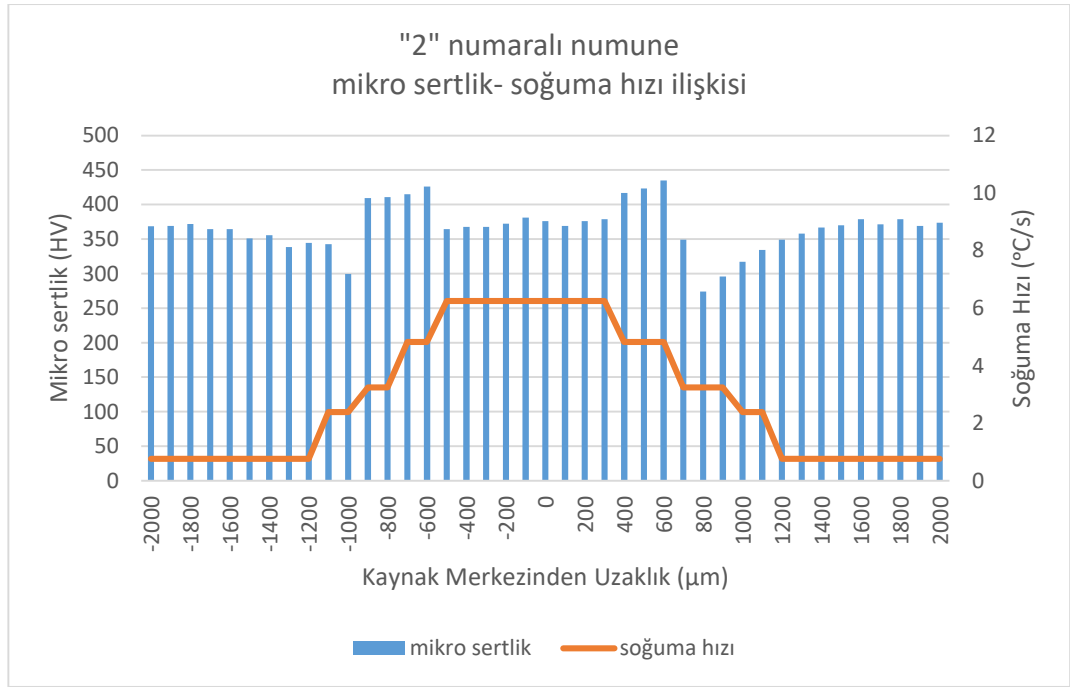
uzaklaştıkça, temel malzemeye doğru iletim ve taşınım ile sıcaklık kayıpları meydana geldiğinden A, B, C ve TM bölgelerinde, soğuma hızları kaynak merkezine kıyasla düşüktür. Kaynak ilerleme yönünde, kaynak merkezinde geriye doğru belirlenen noktalarda (Nokta 1- Nokta 5) ise soğuma hızı çok değişken değildir. Lazer gücü, ilerleme hızı, lazer açısı parametreleri ayarlanarak termal döngü ve soğuma hızı istenilen düzeye getirilebilir.

Çeliklerde elde edilen mikro sertlik, soğuma hızı ile doğrudan ilişkilidir. Soğuma hızı düşük olduğunda mikro sertlik değerleri düşmektedir; soğuma hızı arttığında mikro sertlik değerleri yükselmektedir. “1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14” numaralı numunelerin sertlik ve soğuma hızı ilişkileri Şekil 4.48 - Şekil 4.55’de gösterilmiştir. Mikro sertlik değerleri esasen, kaynak sırasında faz dönüşümleri ve mikro yapı ile alakalıdır. Termal analizde kaynak merkezi, A, B, C, bölgeleri ile ifade edilen bölgeler mikro yapıda sırasıyla EB, İT-ITAB, KT-ITAB, İK-ITAB bölgelerine karşılık gelmektedir. Yüksek ısı girdisinde (düşük soğuma hızı) EB içerisinde nispeten kaba martenzit oluşumları gerçekleştiğinden sertlik değerleri düşmektedir. Düşük ısı girdisinde (yüksek soğuma hızı) EB’de daha ince yapılı martenzit oluştuğundan mikro sertlik artmaktadır. Termal döngü ve soğuma hızının kaynak havuzu katılma özelliklerini etkilemesi dolayısıyla mikro yapı, mikro sertlik ile ilişkilidir (Gould ve ark. 2006).

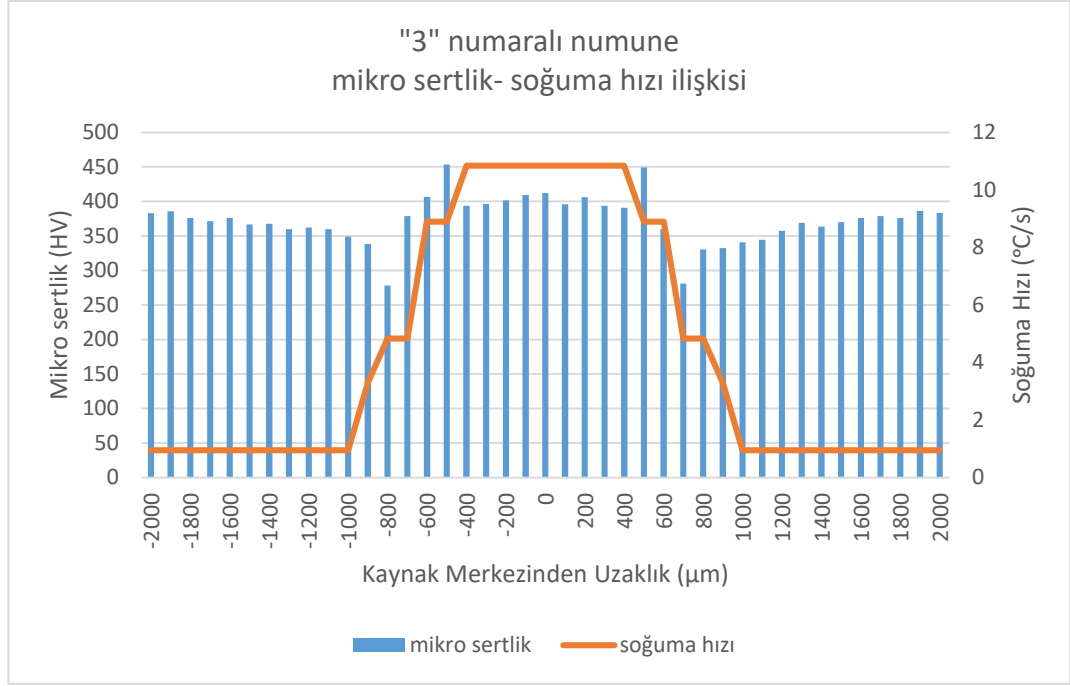




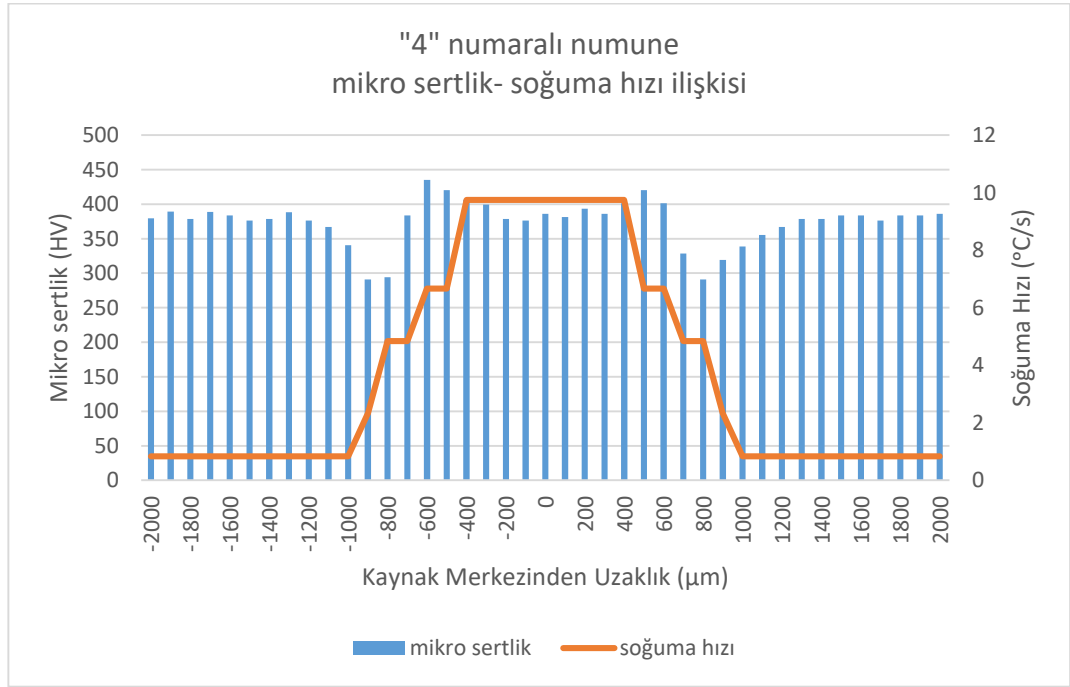
**Şekil 4.48.** “1” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



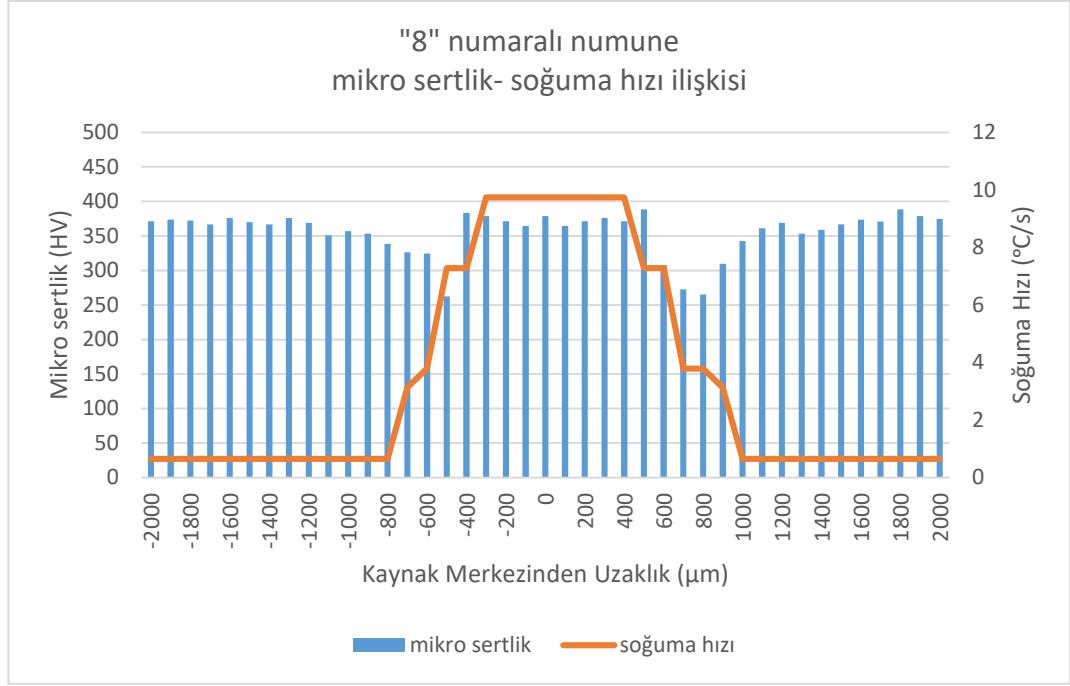
**Şekil 4.49.** “2” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



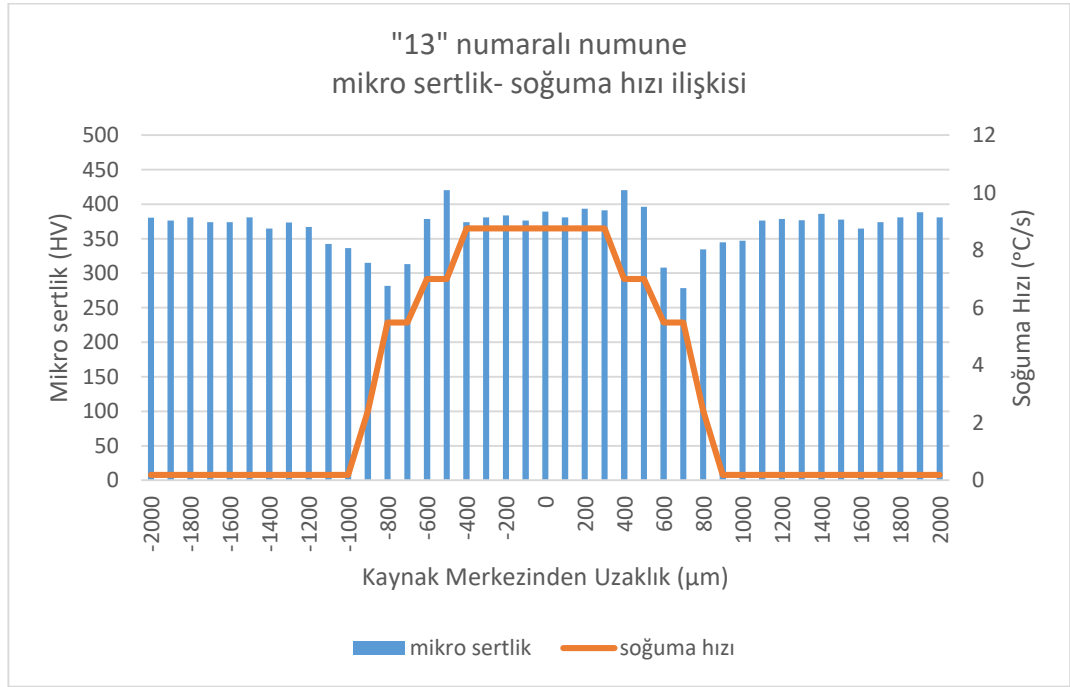
**Şekil 4.50.** “3” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



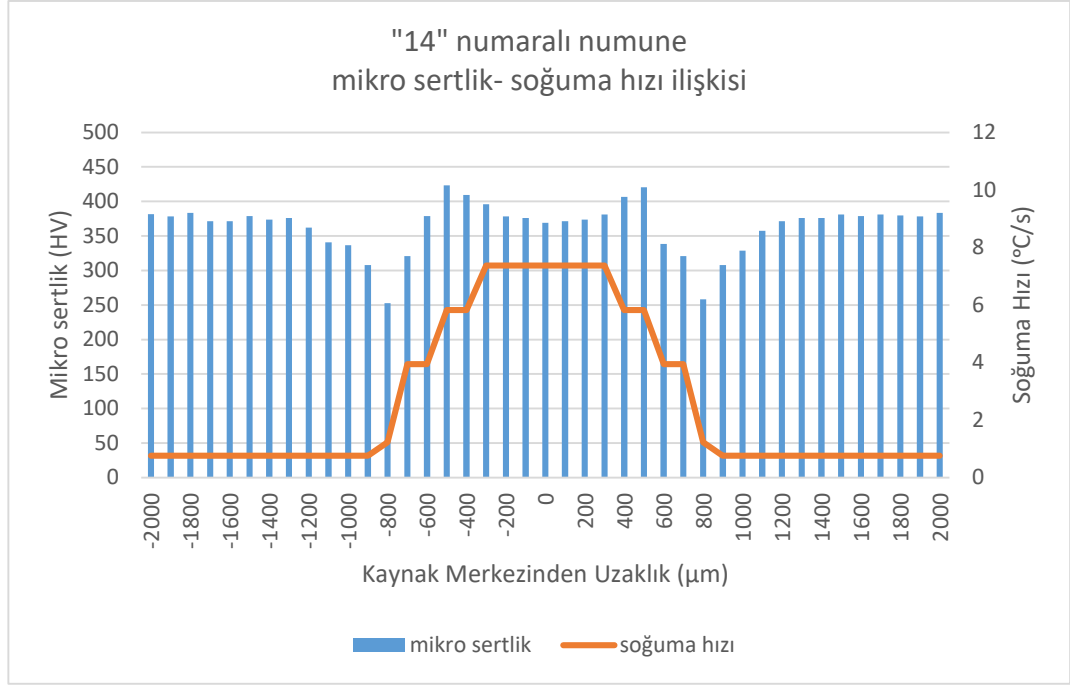
**Şekil 4.51.** “4” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



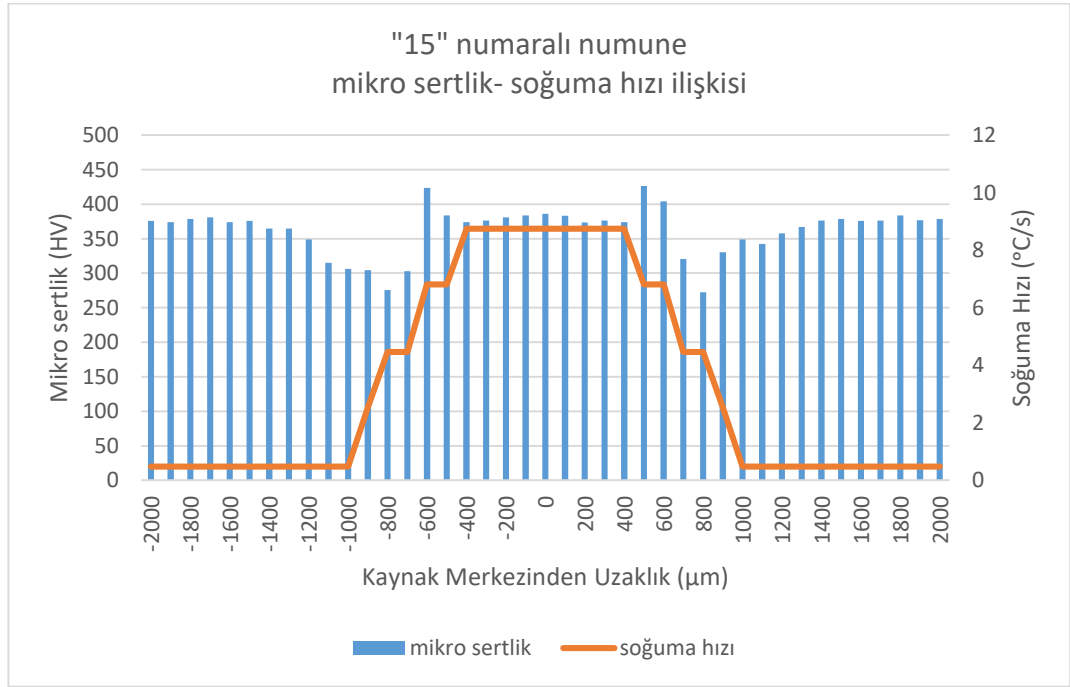
**Şekil 4.52.** “8” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



**Şekil 4.53.** “13” numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



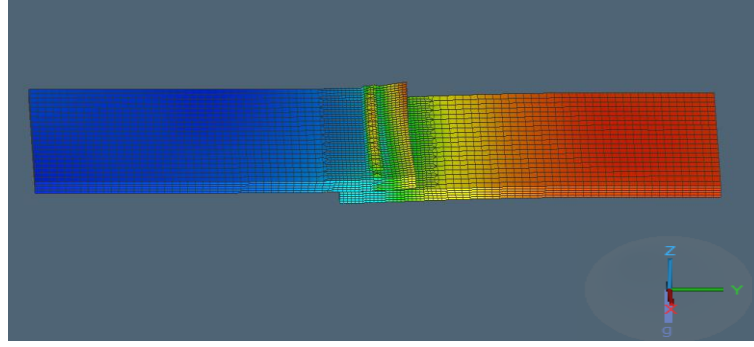
**Şekil 4.54.** "14" numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği



**Şekil 4.55.** "15" numaralı numune mikro sertlik ve soğuma hızı ilişkisi grafiği

#### 4.10. Simufact Analizi

Simufact Welding programı yardımıyla lazer kaynak prosesi simule edilerek distorsiyon miktarı ve gerilme dağılımı değerleri hesaplanmıştır. “1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler için X, Y, Z doğrultularında normal gerilme, eşdeğer gerilme, maksimum asal gerilme; X, Y, Z doğrultularında ve toplam deplasman miktarı; plastik şekil değiştirme ve elastik şekil değiştirme bilgileri elde edilmiştir. X, Y, Z doğrultularının yönleri Şekil 4.56 üzerinde belirtilmiştir, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10’da yer almaktadır. Simufact programından elde edilen çıktıların ekran görüntüleri Şekil 4.57’de yer almaktadır, diğer numunelerin çıktıları EKLER bölümünde EK 20-EK 26 arasındadır.



**Şekil 4.56.** Simufact programı arayüzü ve X, Y, Z doğrultularının gösterimi

Proses parametrelerine göre farklı sonuçlar elde edilmektedir. Elde edilen gerilme ve deplasman değerleri ısı girdisine bağlı olarak değişmektedir: ısı girdisi arttıkça lazer kaynak işlemi sonrasında plakalarda oluşan gerilme artmaktadır. Gerilme değeri artışıyla deplasman değerleri de artmaktadır.

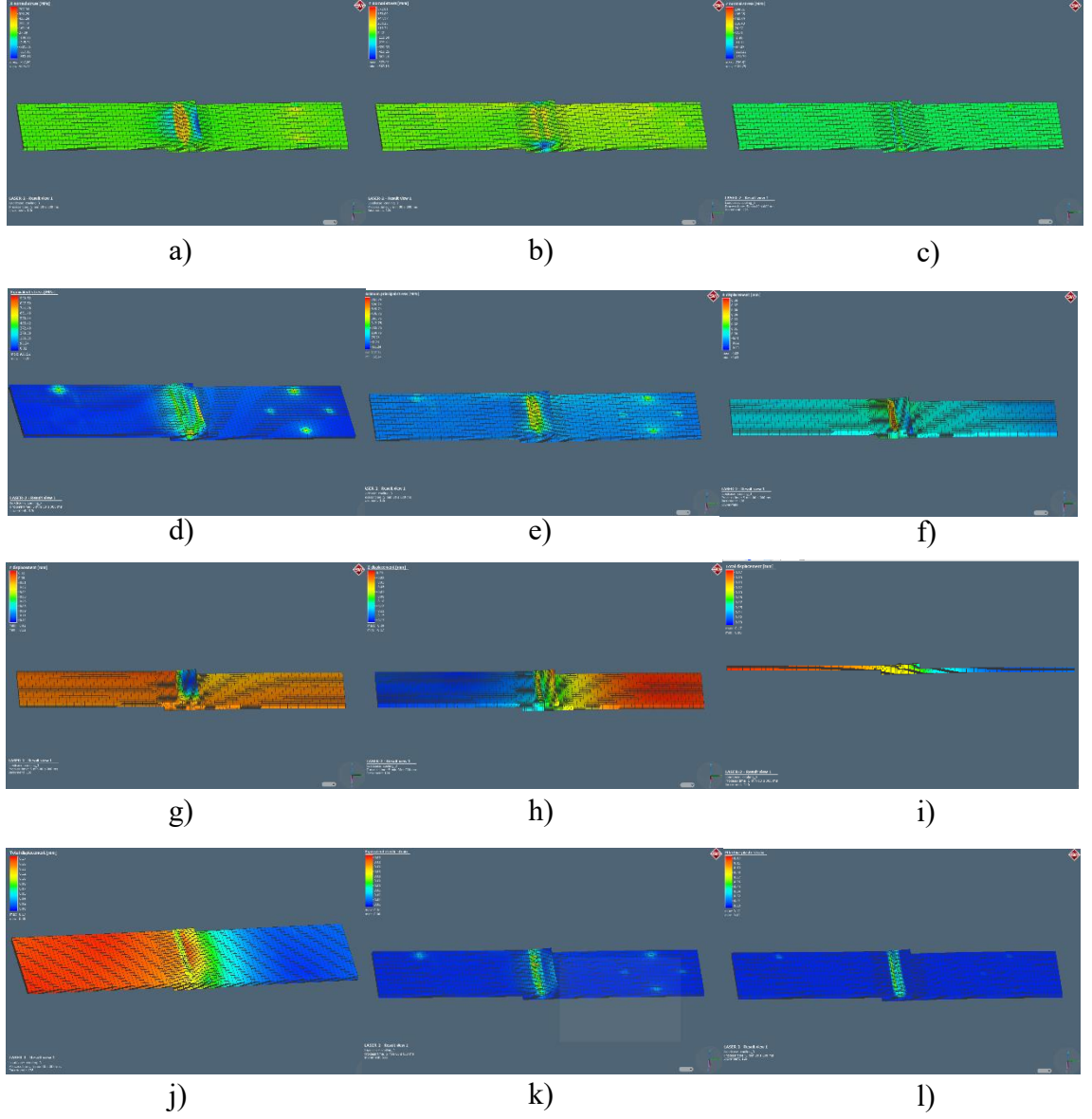
Simulasyonu gerçekleştirilen numuneler arasında en yüksek ısı girdisine sahip “2” ve en düşük ısı girdisine sahip “3” numara kıyaslandığında, yüksek ısı girdisi numunesinin gerilme ve deplasman değerlerinin daha yüksek olduğu tüm sonuçlarda gözlemlenmektedir. “13”, “14” ve “15” numaralı numuneler eşit ısı girdisine sahiptir, lazer açıları farklıdır. 90° lazer açısına sahip “14” numaralı numunede eşdeğer gerilme ve maksimum asal gerilme değerleri diğer iki numuneye göre daha yüksektir, lazer

ışınının dik açı ile gelmesi daha dar bir alanda ergiyik havuz oluşturur, yüksek soğuma hızı ile birlikte stresin yüksek olmasına neden olmaktadır. Stres konsantrasyonu ve kalıntı gerilmeler çatlak oluşumunda etkilidir (Lee ve ark. 2021). Numune bazında inceleme yapıldığında ise X, Y, Z doğrultularında normal gerilmelerde farklılık olduğu tespit edilmiştir. X yönünde daha yüksek gerilmeler meydana gelirken en düşük gerilme Z doğrultusunda meydana gelmektedir.

Simufact Welding programında “1”, “2”, “3”, “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler için termal analiz yapılmıştır. Kaynak bölgesinde oluşacak EB ve ITAB sınırları simule edilmiş, daha önce optik mikroskop yardımıyla elde edilen mikro yapılar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.58). Mikro yapılar ile simulasyon sonuçları benzerlik göstermektedir. Simulasyon sonuçları, ısı girdisine ve parametrelere göre kaynak geometrisinde oluşabilecek değişiklikler hakkında bilgi vermektedir; kaynak genişliği ve kök uzunlukları incelenen numunelerde parametrelere göre farklılık göstermektedir.

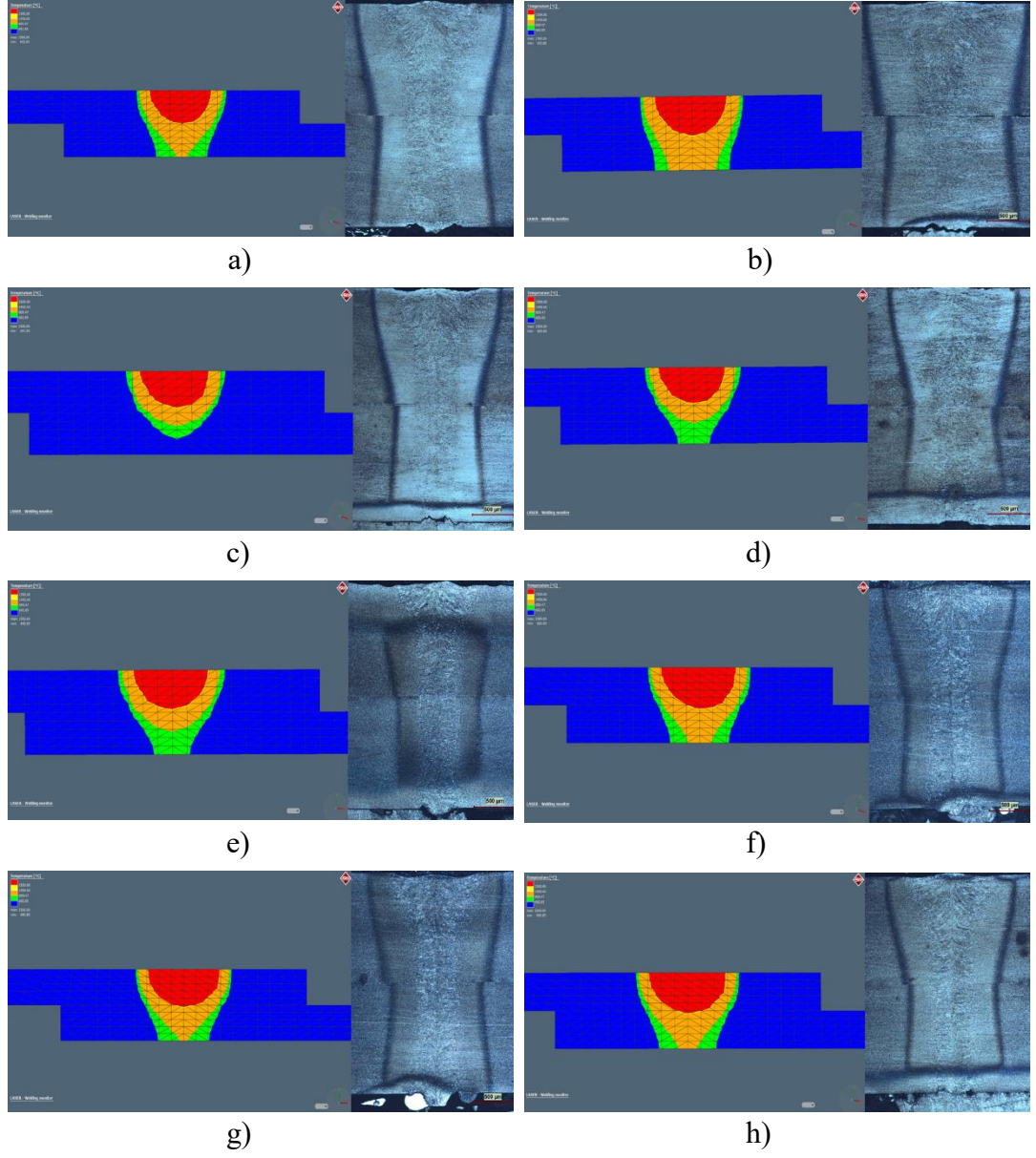
**Çizelge 4.10.** Simufact welding termomekanik analiz sonuçları

Simulasyon Değerleri		Numune No							
		1	2	3	4	8	13	14	15
X normal gerilme (MPa)	max	707,3	738	728,6	785,1	777,2	785,6	823,9	813,9
	min	-653,2	-661,8	-588,8	-624,8	-631,8	-637,7	-629,6	-628
Y normal gerilme (MPa)	max	572	564,6	312,4	416,5	374,3	498,8	408,5	403,5
	min	-567,2	-667,8	-476,1	-535,3	-510,7	-550	-598,6	-599,2
Z normal gerilme (MPa)	max	234,8	163,3	159,8	171,2	160,2	166,7	157,6	182,2
	min	-159,8	-184,4	-202,7	-207,4	-201,1	-185	-191,7	-191,1
Eşdeğer gerilme (MPa)	max	930,5	845,6	668,7	688,8	713,6	698,4	718,3	709,3
	min	0,32	0,41	0,01	0,01	0,01	0,21	0	0
Maksimum asal gerilme (MPa)	max	707,7	739,5	728,8	785,8	777,3	785,6	824,3	814,2
	min	-82,24	-60,41	-30,62	-41,45	-33,36	-44,73	-30,84	-29,65
X deplasman (mm)	max	0,08	0,1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,17	0,17
	min	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,09	-0,04	-0,04	-0,04
Y deplasman (mm)	max	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
	min	-0,12	-0,13	-0,1	-0,1	-0,1	-0,11	-0,12	-0,12
Z deplasman (mm)	max	0	0,02	0,18	0,13	0,2	0,06	0	0,02
	min	-0,17	-0,34	-0,01	-0,06	-0,01	-0,05	-0,2	-0,2
Toplam deplasman (mm)	max	0,17	0,34	0,2	0,15	0,22	0,12	0,2	0,2
	min	0	0,02	0,01	0,03	0,04	0,01	0,09	0,09
Elastik şekil değiştirme	max	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	min	0	0	0	0	0	0	0	0
Plastik şekil değiştirme	max	0,12	0,16	0,09	0,1	0,09	0,11	0,12	0,12
	min	0	0	0	0	0	0	0	0



**Şekil 4.57.** “1” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme





**Şekil 4.58.** Kaynak bölgesi simülasyon çıktıları ile gerçek mikro yapı karşılaştırması a) “1” numaralı numune, b) “2” numaralı numune, c) “3” numaralı numune, d) “4” numaralı numune, e) “8” numaralı numune, f) “13” numaralı numune, g) “14” numaralı numune, h) “15” numaralı numune

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada ultra yüksek mukavemetli DP1200 çeliklerin bindirme lazer kaynağı incelemeleri yapılmıştır; kaynak işlemi, termal kamera ile kayıt altına alınmıştır. Yanıt Yüzey Metodolojisi Merkezi Kompozit Deney Tasarımı kullanılarak lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametrelerinin 5 seviyesi için fiber lazer kaynak uygulaması yapılmıştır. Kaynak dikiş yüzeyi, mikro yapı incelemeleri ile birlikte kaynak geometrisi değerleri belirlenmiş; mikro sertlik, kırılma yüzeyleri yorumlanmıştır. Maksimum çekme mukavemeti amaç fonksiyonu için proses parametreleri optimize edilerek etkin parametreler belirlenmiştir. Termal kamera verileri analiz edilmiş ve Simufact Welding programı ile kaynak işlemi simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Yüksek lazer gücü ile oluşan ısı girdisi; geri tepme basıncı (recoil pressure) ve yüzey gerilimi etkisi ile birlikte kaynak çevresinde sıçrama (spatter) problemlerine neden olmaktadır. Kaynak sırasında oluşan kararsız plazma bulutu büyük boyutlu sıçramalara neden olmaktadır; numunelerin arka yüzeylerinde belirgin olarak sıçrama etkisi gözlemlenmiştir.

Kaynak mikro yapısı erime bölgesi (EB), Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) ve temel malzeme (TM) bölgelerinden oluşmaktadır. Kaynak geometrileri proses parametreleri ile değişkenlik göstermektedir: lazer gücü artışı ile daha geniş kaynak geometrileri elde edilirken, ilerleme hızı artışının ısı girdisini düşürmesi ile kaynak geometrileri daralmıştır. Lazer gücü ve ilerleme hızı eşit olduğunda 75° lazer açısında 85°'ye kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir; 70°, 80°, 90° lazer açıları kıyaslandığında ise geniş kaynak geometrilerine 90°'de ulaşılmıştır.

EB mikro yapısı soğutma hızı ve malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak martenzitik yapıdadır. ITAB'da kaynak merkezinden uzaklık, yerel maksimum sıcaklık, soğuma hızı ve sıcaklığa maruz kalma süresi değişkenlerine bağlı olarak farklı faz yapıları oluşmaktadır: kaba taneli ITAB (KT-ITAB), ince taneli ITAB (İT-ITAB), inter kritik ITAB (İK-ITAB) ve alt kritik ITAB (AK-ITAB). EB'de oluşan martenzit yapısı

ısı girdisine göre farklılaşmıştır: düşük ısı girdisinde soğuma yönü doğrultusunda uzun yapılı ve ince taneli iken; yüksek ısı girdisinde kısa, küt, kalın ve sütunlu yapıdadır. KT-ITAB ve İT-ITAB bölgelerinde genel olarak martenzit gözlemlenmektedir. Isı girdisi düşük numunelerde daha ince yapılı taneler gözlemlenmiştir. İT-ITAB bölgesi EB'ye kıyasla daha ince taneli martenzit yapısından oluşmaktadır; bu durum mikro sertliğin EB'den yüksek olmasına neden olmuştur. Mikro yapıda koyu renkte dağlanmış dar bölge İK-ITAB olarak tanımlanmaktadır, martenzit ve ferritten oluşan kaba ve ince taneli karışık bir yapı mevcuttur. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça ferrit miktarı artmakta, martenzit miktarı azalmaktadır. AK-ITAB bölgesinde maruz kalınan düşük sıcaklık dolayısıyla martenzit yapısı temperlenmektedir. Yüksek ısı girdisinde martenzit yapısı yüksek oranda temperlendiğinden martenzit yapısı bozulmuş ve düşük mikro sertlik elde edilmiştir.

Mikro sertlik grafikleri tüm numuneler için benzer formdadır. EB mikro sertliği, tamamıyla martenzit yapısı nedeniyle temel malzemedan yüksektir. İT-ITAB'da mikro sertlik değerleri artış eğilimindedir. AK-ITAB'da temperlenmiş martenzit yapısı ile açıklanan “yumuşama bölgesi” nedeniyle mikro sertlik değerleri temel malzemedan daha düşüktür. Isı girdisindeki azalma ile martenzit yapısının incelendiği ve mikro sertliğin arttığı; ısı girdisindeki yükselme ile birlikte martenzit yapısının kalınlaştığı ve sertlik düşüşü meydana geldiği tespit edilmiştir. Lazer gücü parametresi sabit olup ilerleme hızı arttığında, düşük ısı girdisi elde edildiğinden ince martenzit yapısı oluşumu ile açıklanan yüksek mikro sertlik değerlerine ulaşılmaktadır. Lazer gücü ve ilerleme hızı sabit, lazer açısı parametresi değiştirildiğinde düşük dereceye sahip açıda daha yüksek mikro sertlik değerleri elde edilmektedir.

Numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çekme testi sonrası maksimum kayma kuvveti ve yüzde uzama değerleri elde edilmiş, birim (mm) başına taşınabilecek yük hesaplanmıştır. En yüksek kayma kuvveti 5,9555 kN, en düşük kayma kuvveti 4,1391 kN olarak elde edilmiştir. EB sertlik artışı sonucu gevrekleşme, maksimum kuvvet değerindeki düşüşün sebebidir. Maksimum ve minimum yüzde uzama miktarı sırasıyla %0,4250, %0,2797'dir. Maksimum kayma kuvveti ve yüzde uzama değerlerinin elde edilmesinde lazer gücünün yüksek, ilerleme hızının düşük, lazer

açısının düşük seviyede olması etkili olmuştur. İlerleme hızının yüksek olmasıyla ısı girdisi düşmesi nedeniyle yetersiz mekanik özellikler elde edilmektedir. Kayma kuvveti, kaynak geometrisinde “bonding” olarak tanımlanan iki plaka arasındaki EB tam birleşme mesafesi ile ilişkilidir; doğru orantılı olarak artma ve azalma eğilimindedir.

Lazer kaynak parametrelerinin kayma kuvvetine etki oranları ve optimum proses parametreleri Minitab programı yardımıyla Yanıt Yüzey Metodolojisine göre belirlenmiştir. Etkin parametreler sırası ile ilerleme hızı, lazer açısı ve lazer gücüdür. İlerleme hızı parametresi %48,10 etki oranı ile en etkin parametredir. Lazer açısı parametresi %11,96, lazer gücü parametresi %2,26 etki oranlarına sahiptir. Analiz %85,37 güvenilirlik oranına sahiptir. Yanıt Yüzey Metodolojisine göre yapılan analiz sonucunda bir regresyon denklemi elde edilmiş; tahmini değerler ile deneysel çıktılar karşılaştırılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır, sonuçlar birbirine yakın ve tutarlıdır. Lazer gücü, ilerleme hızı ve lazer açısı parametrelerinin Sigma Plot programı yardımıyla yüzey ve kontür grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen optimum parametreler lazer gücü için 2800 W, ilerleme hızı için 40 mm/s, lazer açısı için 70 °'dir; bu parametreler ile üretilen numunenin çekme testi sonrası maksimum kayma kuvvetinin 6,927 kN olacağı tahmin edilmektedir.

Martenzit ve ferrit fazları dolayısıyla kırılma morfolojilerinde sünek ve gevrek yapı, yerel bölgelerde birlikte bulunmaktadır; ısı girdisi, kırılma modunu ve kırılma morfolojisini etkilemektedir. Yüksek ısı girdisinde (55,79 J/mm) gevrekliğin kanıtı düşük tokluk özelliklerine sahip klivaj oluşumları gözlenmiştir; kırılma, EB'yi kapsayacak şekilde KT-ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir. Klivaj kırılmalar erime bölgesinden gerçekleşmiştir. Düşük ısı girdisine sahip (37,60 J/mm) numunenin kırılma yüzeyi tipik sünek çukur morfolojisindedir, çukurlar küçük ve sık yapıda olduğundan gerilim yığılması dar bir alanda düşük uzamaya sebep olmuştur. Kırılma, İT-ITAB bölgesinden gerçekleşmiştir. 75 ° ve 85° lazer açısı parametreleri değerlendirildiğinde düşük lazer açısında elde edilen yüksek sertlik değerleri, gevreklik ve klivaj oluşumları ile ilişkilendirilebilir; martenzit yapısı etkin hale gelerek gevrekliği arttırmaktadır. Ayrıca düşük lazer açısı (70°) parametresinin kullanımı ile kırılma, kaynak merkezinden (erime bölgesi) gerçekleşmiştir. Lazer açısı parametresinin yüksek olması (90°) ise

kırılma bölgesinin kaynak merkezinden uzaklaşmasına ve ITAB bölgesi içerisinde kalmasına neden olmuştur. SEM incelemelerinde küresel ve elips şeklinde siyah renkli gözenek oluşumları da gözlenmiştir.

Kaynak havuzu içerisinde kaynak merkezi, A, B, C noktaları, temel malzeme bölgeleri ve kaynak ilerleme yönünün tersinde belirlenen 5 adet nokta için termal kamera çıktıları analiz edilmiştir. Isı girdisi arttıkça ulaşılan maksimum sıcaklık artmış ve tüm numunelerde farklı değerler elde edilmiştir. Maksimum sıcaklığa kaynak merkezinde ulaşılrken (1896 °C), kaynak merkezinden uzaklaştıkça A, B ve C noktalarında sıcaklık düşmüştür, en düşük sıcaklıklar temel malzemede elde edilmiştir. Lazer gücü artışı ve ilerleme hızı düşüşü ile sıcaklık gradyeni geniş bir alana yayıldığından, soğuma yavaş gerçekleşmektedir; soğuma hızı düşüktür. Yüksek ısı girdisinde kaynak merkezi soğuma hızı 6,25 °C/s, düşük ısı girdisinde 10,84 °C/s'dir. Ayrıca mikro sertlik ve soğuma hızı değerleri ilişkilendirilmiştir: soğuma hızı düşük olduğunda düşük mikro sertlik değerleri elde edilmiş (yüksek ısı girdisinde kalın martenzit oluşumu nedeniyle); yüksek soğuma hızında ise mikro sertlik değerleri yükselmiştir (düşük ısı girdisinde ince martenzit oluşumu nedeniyle).

Lazer kaynak işlemi Simufact Welding programında simüle edilerek X, Y, Z doğrultularında normal gerilme, eşdeğer gerilme, maksimum asal gerilme; X, Y, Z doğrultularında ve toplam deplasman miktarı; plastik şekil değiştirme ve elastik şekil değiştirme bilgileri elde edilmiştir. Parametrelere bağlı olarak farklı gerilme ve deplasman değerleri elde edilmiştir: ısı girdisi arttığında kaynak sonrasında plakalarda oluşan gerilme ve deplasman değerleri artmaktadır. Lazer açısına göre kıyaslama yapıldığında 90° lazer açısında eşdeğer gerilme ve maksimum asal gerilme için yüksek değerler elde edilmiştir. Ayrıca Simufact Welding programında EB ve ITAB sınırları simüle edilerek optik mikroskop mikro yapıları ile karşılaştırılmıştır, kaynak geometrisi benzerlik göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- Ai, Y., Jiang, P., Shao, X., Li, P., Wang, C., Mi, G., Geng, S., Liu, Y., Liu, W. 2017. The prediction of the whole weld in fiber laser keyhole welding based on numerical simulation. *Applied Thermal Engineering*, 113:, 980–993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.050>
- Alferov, Z. I. 1970. Electroluminescence of Heavily Doped Heterojunctions. , 2:, 869–884.
- 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>
- Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P. 2014. Investigations into the influence of weld zone on formability of fiber laser-welded advanced high strength steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(4):, 1465–1479. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0881-3>
- Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Baltazar-Hernandez, V. H., Zhou, Y. N. 2016a. 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>
- Bandyopadhyay, K., Panda, S. K., Saha, P., Baltazar-Hernandez, V. H., Zhou, Y. N. 2016b. 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>
- Buddu, R. K., Chauhan, N., Raole, P. M., Natu, H. 2015. Studies on mechanical properties, microstructure and fracture morphology details of laser beam welded thick SS304L plates for fusion reactor applications. *Fusion Engineering and Design*, 95:, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.04.001>
- Cao, X., Jahazi, M. 2009. Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11):, 1231–1241. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.05.010>
- Chen, Lian, Nie, P., Qu, Z., Ojo, O. A., Xia, L., Li, Z., Huang, J. 2020. Influence of heat input on the changes in the microstructure and fracture behavior of laser welded

- 800MPa grade high-strength low-alloy steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 50(2019):, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.007>
- Chen, Lin, Wang, C., Xiong, L., Zhang, X., Mi, G. 2020. Microstructural, porosity and mechanical properties of lap joint laser welding for 5182 and 6061 dissimilar aluminum alloys under different place configurations. *Materials and Design*, 191:, 108625. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108625>
- Chen, Z., Yang, S., Wang, C., Hu, X., Shao, X., Wang, J. 2014. A study of fiber laser welding of galvanized steel using a suction method. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7):, 1456–1465. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.013>
- Dahotre, N. B., Harimkar, S. P. 2008. *Laser Fabrication and Machining of Materials*, Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-72344-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-72344-0_3)
- Datta, S., Raza, M. S., Das, A. K., Saha, P., Pratihari, D. K. 2020. Experimental investigations and parametric optimization of laser beam welding of NiTiInol sheets by metaheuristic techniques and desirability function analysis. *Optics and Laser Technology*, 124(October 2019):, 105982. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105982>
- 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>
- Einstein, A. 1917. On the Quantum Theory of Radiation. *The Old Quantum Theory*, 18(18):, 167–183. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-012102-4.50018-8>
- Evin, E., Németh, S., Tomáš, M. 2015. Effect of laser welding on safety characteristics of high strength steels sheets. *Acta Metallurgica Slovaca*, 21(3):, 184–194. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i3.603>
- Fonstein, N. 2016. Dual-phase steels. , *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications:* , 169–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100638-2.00007-9>
- Fox, A. G., Li, T. 1961. Resonant modes in a maser interferometer. *The Bell System Technical Journal*, 40(2):, 453–488. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1961.tb01625.x>

- Geusic, J. E., Marcos, H. M., Van Uitert, L. G. 1964. Laser oscillations in nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets. *Applied Physics Letters*, 4(10):, 182–184. <https://doi.org/10.1063/1.1753928>
- Gordon, J. P., Zeiger, H. J., Townes, C. H. 1954. Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of NH<sub>3</sub>. *Physical Review*, 95(1):, 282–284. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.282>
- Gould, J. E., Khurana, S. P., Li, T. 2006. Predictions of Microstructures when Welding Automotive Advanced High-Strength Steels. *Welding Research*, 85(5):, 111–116.
- Guo, W., Wan, Z., Jia, Q., Ma, L., Zhang, H., Tan, C., Peng, P. 2020. Laser weldability of TWIP980 with DP980/B1500HS/QP980 steels: Microstructure and mechanical properties. *Optics and Laser Technology*, 124(37):, 105961. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105961>
- Huang, Z., Luo, Z., Ao, S., Cai, Y. 2018. Effect of Laser Welding Parameters on Weld Bowing Distortion of Thin Plates. *High Temperature Materials and Processes*, 37(4):, 299–311. <https://doi.org/10.1515/htmp-2016-0153>
- Javan, A., Bennett, W. R., Herriott, D. R. 1961. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6(3):, 106–110. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.106>
- Jelinkova, H., Sulc, J. 2013. *Laser characteristics*, Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857097545.1.17>
- 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>
- Kim, D. Y., Park, Y. W. 2012. Weldability evaluation and tensile strength estimation model for aluminum alloy lap joint welding using hybrid system with laser and scanner head. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(3):, 596–604. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61771-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61771-3)
- Kouadri-Henni, A. 2017. Effect of welding laser process on macrostructures and the mechanical properties of coating steel DP600: Influence of vaporization zinc. *Journal of Manufacturing Processes*, 30:, 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.025>



- Kumar, N., Mukherjee, M., Bandyopadhyay, A. 2017. Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics and Laser Technology*, 94:, 296–309. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008>
- Lakshminarayana, P. V. S., Gautam, J. P., Mastanaiah, P., Reddy, G. M., Sankara Rao, K. B. 2018. Influence of Beam Power and Traverse Speed in Fibre Laser welding of Dual phase steel (590) on Depth of weld zone penetration, Microstructure and Hardness. *Materials Today: Proceedings*, 5(9):, 17132–17138. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.121>
- Lee, J., Yamashita, S., Ogura, T., Saida, K. 2021. Effects of cooling rate on solidification cracking behaviour in 310S stainless steel. *Journal of Advanced Joining Processes*, 3(2020):, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100044>
- Li, L., Zheng, J., Wang, C. 2020. Fatigue behavior improvements of laser-induction hybrid welded S690QL steel plates. *Optics and Laser Technology*, 126(106101):. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106101>
- Li, W., Ma, L., Peng, P., Jia, Q., Wan, Z., Zhu, Y., Guo, W. 2018. Microstructural evolution and deformation behavior of fiber laser welded QP980 steel joint. *Materials Science and Engineering A*, 717:, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.050>
- Liu, Gui-qian, Gao, X. dong, Peng, C., Liu, X. hang, Huang, Y. jie, Zhang, Y. xi, You, D. yong 2020. Tensile resistance, microstructures of intermetallic compounds, and fracture modes of welded steel/aluminum joints produced using laser lap welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(10):, 2639–2649. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65408-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65408-5)
- Liu, Guiqian, Gao, X., Peng, C., Huang, Y., Fang, H., Zhang, Y., You, D., Nanfeng, Z. 2020a. Optimization of laser welding of DP780 to Al5052 joints for weld width and lap-shear force using response surface methodology. *Optics and Laser Technology*, 126(106072):. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106072>
- Liu, Guiqian, Gao, X., Peng, C., Huang, Y., Fang, H., Zhang, Y., You, D., Nanfeng, Z. 2020b. Optimization of laser welding of DP780 to Al5052 joints for weld width and lap-shear force using response surface methodology. *Optics and Laser Technology*, 126(2019):, 106072. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106072>
- Liu, Y., Dong, D., Han, Z., Yang, Z., Wang, L., Dong, Q. 2018a. Microstructure and

- Strain Rate-Dependent Tensile Deformation Behavior of Fiber Laser-Welded Butt Joints of Dual-Phase Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(5):, 2148–2165. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3295-9>
- Liu, Y., Dong, D., Han, Z., Yang, Z., Wang, L., Dong, Q. 2018b. Microstructure and Strain Rate-Dependent Tensile Deformation Behavior of Fiber Laser-Welded Butt Joints of Dual-Phase Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(5):, 2148–2165. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3295-9>
- Long, J., Huang, W., Xiang, J., Guan, Q., Ma, Z. 2018. Parameter optimization of laser welding of steel to Al with pre-placed metal powders using the Taguchi-response surface method. *Optics and Laser Technology*, 108:, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.06.026>
- Lun, N., Saha, D. C., Macwan, A., Pan, H., Wang, L., Goodwin, F., Zhou, Y. 2017. Microstructure and mechanical properties of fibre laser welded medium manganese TRIP steel. *Materials and Design*, 131:, 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.037>
- Maiman, T. H. 1960. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Essentials of Lasers*, 87(1959):, 134–136. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-013320-1.50016-6>
- Manonmani, K., Murugan, N., Buvanasekaran, G. 2007. Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(11–12):, 1125–1133. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0432-7>
- Matthews, D. L., Hagelstein, P. L., Rosen, M. D., Eckart, M. J., Ceglio, N. M., Hazi, A. U., Meddecki, H., MacGowan, B. J., Trebes, J. E., Whitten, B. L., Campbell, E. M., Hatcher, C. W., Hawryluk, A. M., Kauffman, R. L., Pleasance, L. D., Rambach, G., Scofield, J. H., Stone, G., Weaver, T. A. 1985. Demonstration of a soft x-ray amplifier. *Physical Review Letters*, 54(2):, 110–113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.54.110>
- Mei, L., Chen, G., Jin, X., Zhang, Y., Wu, Q. 2009. Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11):, 1117–1124. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.06.016>
- Mei, L., Yan, D., Chen, G., Wang, Z., Chen, S. 2017. Influence of laser beam incidence angle on laser lap welding quality of galvanized steels. *Optics Communications*,

- 402:, 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.05.032>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Andersen Cook, C. M. 2008. Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments, New Jersey, ABD, : Wiley.
- Nayak, S. S., Biro, E., Zhou, Y. 2015. Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), Kanada, : Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-436-0.00005-9>
- Ning, J., Hong, K. M., Inamke, G. V., Shin, Y. C., Zhang, L. J. 2019. Analysis of microstructure and mechanical strength of lap joints of TZM alloy welded by a fiber laser. *Journal of Manufacturing Processes*, 39:, 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.015>
- Oğuz Tunçel 2020. Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Farklı Türdeki Yüksek/Ultra Mukavemetli Çeliklerde Mekanik ve Mikroyapı İlişkilerinin İncelenmesi (Doktora Tezi), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü. Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (625920).
- Parkes, D., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. 2014a. Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures. *Materials and Design*, 56:, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.087>
- Parkes, D., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Zhou, Y., Goodwin, F., Bhole, S., Chen, D. L. 2014b. Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-phase steels at warm and low temperatures. *Materials and 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>
- Patel, C. K. N. 1964. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO<sub>2</sub>. *Physical Review*, 136(5A): <https://doi.org/10.1103/PhysRev.136.A1187>
- Piekarska, W., Kubiak, M. 2013. Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser-arc hybrid welding processes using projection method. *Applied*

- Mathematical Modelling, 37(4):, 2051–2062.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.052>
- Reisgen, U., Schleser, M., Mokrov, O., Ahmed, E. 2012. Optimization of laser welding of DP/TRIP steel sheets using statistical approach. *Optics and Laser Technology*, 44(1):, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.06.028>
- Saha, D. C., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Biro, E., Gerlich, A. P., Zhou, Y. 2014a. 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., Westerbaan, D., Nayak, S. S., Biro, E., Gerlich, A. P., Zhou, Y. 2014b. 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>
- Schawlow, A. L., Townes, C. H. 1958. Infrared and optical masers. *Physical Review*, 112(6):, 1940–1949. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1940>
- Sorokin, P. P., Stevenson, M. J. 1960. Stimulated infrared emission from trivalent uranium. *Physical Review Letters*, 5(12):, 557–559. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.5.557>
- Steen, W. M., Mazumder, J. 2010. *Laser Material Processing*, Springer eBook. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
- Wang, X. N., Sun, Q., Zheng, Z., Di, H. S. 2017. Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs. *Materials Science and Engineering A*, 699:, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.078>
- Weber, J. 1953. Amplification of microwave radiation by substances not in thermal equilibrium. *Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices*, PGED-3(3):, 1–4. <https://doi.org/10.1109/irepged.1953.6811068>
- 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>
- Yang, J., Zhang, H., Li, Y. L. 2015. Optimization of Nd:YAG laser welding of aluminum alloy to stainless steel thin sheets via Taguchi method and Response

- Surface Methodology (RSM). *Lasers in Engineering*, 31(3–4):, 141–159.
- Yuce, C., Karpat, F., Yavuz, N. 2019. Investigations on the microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar galvanized steel–aluminum joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(5–8):, 2693–2704. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04154-7>
- Yuce, C., Tutar, M., Karpat, 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):. <https://doi.org/10.3390/met6100245>
- Zhang, D., Wen, P., Yin, B., Liu, A. 2021. Temperature evolution , phase ratio and corrosion resistance of duplex stainless steels treated by laser surface heat treatment. *Journal of Manufacturing Processes*, 62(2020):, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.040>
- Zhang, M. J., Chen, G. Y., Zhou, Y., Li, S. C., Deng, H. 2013. Observation of spatter formation mechanisms in high-power fiber laser welding of thick plate. *Applied Surface Science*, 280:, 868–875. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.081>
- Zhang, S., Sun, J., Zhu, M., Zhang, L., Nie, P., Li, Z. 2020. Fiber laser welding of HSLA steel by autogenous laser welding and autogenous laser welding with cold wire methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 275(July 2019): <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116353>
- Zhang, W. W., Cong, S. 2017. Process optimization and performance evaluation on laser beam welding of austenitic/martensitic dissimilar materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9–12):, 4161–4168. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0513-9>

## EKLER

- EK 1 “1”, “2”, “3” numaralı numuneler için Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri
- EK 2 “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler için Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri
- EK 3 “4” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 4 “5” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 5 “6” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 6 “7” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 7 “8” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 8 “9” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 9 “10” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 10 “11” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 11 “12” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 12 “13” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 13 “14” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 14 “15” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 15 “16” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 16 “17” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

- EK 17 “18” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK18 “19” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 19 “20” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5
- EK 20 “2” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme
- EK 21 “3” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman, j) elastik şekil değiştirme, j) plastik şekil değiştirme
- EK 22 “4” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme
- EK 23 “8” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme
- EK 24 “13” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme
- EK 25 “14” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme
- EK 26 “15” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme

**EK 1** “1”, “2”, “3” numaralı numuneler için Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri

Mesafe	1. numune		2. numune		3. numune	
	Üst Plaka	Alt plaka	Üst Plaka	Alt plaka	Üst Plaka	Alt plaka
-2000	382,50	383,60	368,80	383,20	382,80	381,30
-1900	381,00	381,30	369,10	371,40	385,90	388,40
-1800	383,50	385,90	371,80	388,40	376,20	378,60
-1700	383,50	376,20	364,50	386,10	371,40	376,20
-1600	384,50	378,60	364,50	373,80	376,20	383,50
-1500	376,20	383,50	351,10	364,50	366,80	378,60
-1400	362,20	373,80	355,50	353,30	367,70	376,20
-1300	357,70	373,80	338,50	344,70	359,90	372,50
-1200	349,00	346,80	344,70	338,50	362,20	373,80
-1100	322,70	332,50	342,60	328,50	359,90	376,20
-1000	297,60	336,50	299,30	296,00	349,00	366,80
-900	273,90	328,60	409,40	275,40	338,50	353,30
-800	364,50	291,60	410,80	302,80	278,40	340,60
-700	435,00	393,50	414,80	344,70	378,60	317,10
-600	414,80	441,00	426,20	432,00	406,60	281,50
-500	388,40	406,60	364,50	406,60	453,30	432,50
-400	388,40	385,90	367,50	398,70	393,50	393,50
-300	391,00	381,00	367,70	388,70	396,40	389,10
-200	394,60	383,50	372,20	362,20	401,30	393,50
-100	398,50	381,00	381,00	376,80	409,40	398,70
0	393,50	385,90	376,20	375,90	412,10	403,50
100	393,54	383,50	369,10	371,00	395,90	398,60
200	381,00	383,50	376,20	373,50	406,20	381,00
300	385,90	388,40	378,60	378,60	393,50	385,90
400	393,50	396,10	416,60	393,50	391,00	441,00
500	383,50	426,20	423,30	423,30	449,10	332,50
600	385,90	330,50	435,00	366,80	359,90	328,50
700	432,00	286,20	349,00	309,80	281,00	309,80
800	336,50	317,10	273,90	291,00	330,50	353,30
900	283,50	324,60	296,00	299,30	332,50	356,20
1000	320,80	346,80	317,00	326,60	340,60	357,70
1100	334,50	353,30	334,50	328,50	344,70	357,70
1200	349,00	362,20	349,00	346,80	357,70	366,80
1300	353,30	381,00	357,70	342,60	369,10	378,60
1400	362,20	385,90	366,80	355,50	363,30	362,20
1500	366,80	385,90	369,90	362,20	369,90	378,60
1600	378,60	378,60	378,60	366,80	376,20	373,80
1700	381,00	381,40	371,40	373,80	378,60	383,50
1800	383,50	388,40	378,60	373,80	376,20	376,20
1900	373,80	387,70	369,10	375,50	386,10	371,00
2000	388,70	388,70	373,80	383,50	383,50	383,50

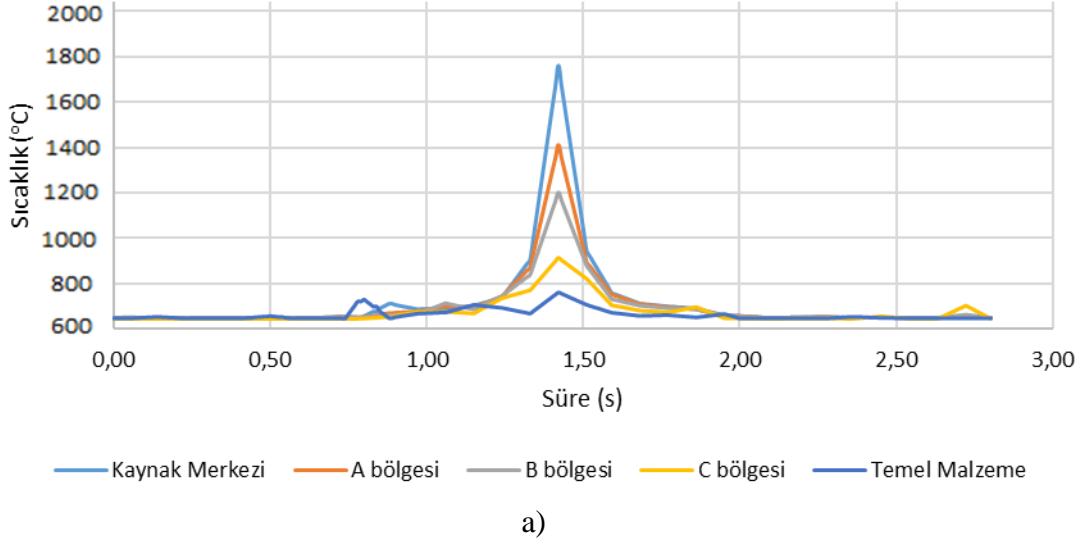


**EK 2** “4”, “8”, “13”, “14”, “15” numaralı numuneler için Vickers mikro sertlik ölçüm değerleri

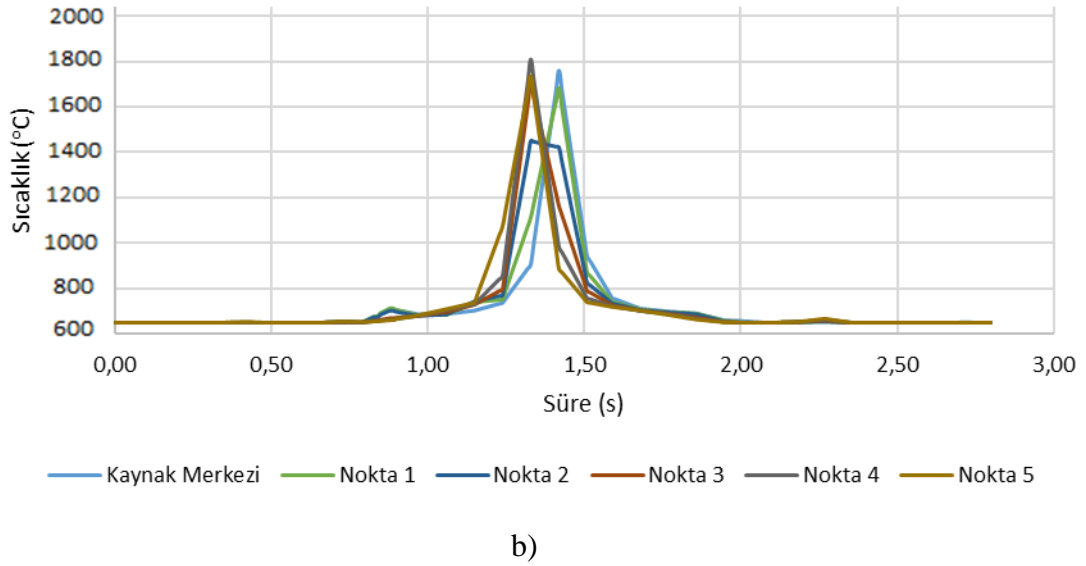
Mesafe	4. numune	8. numune	13. numune	14. numune	15. numune
-2000	379,60	371,60	380,30	381,50	375,80
-1900	389,40	373,80	376,20	378,40	373,80
-1800	378,60	372,20	381,00	383,50	378,60
-1700	388,60	366,80	373,80	371,40	381,00
-1600	383,50	376,20	373,80	371,40	373,80
-1500	376,20	369,90	381,00	378,60	375,90
-1400	378,60	366,80	364,50	373,50	364,50
-1300	388,40	376,20	373,50	376,20	364,50
-1200	376,20	369,10	366,80	362,20	349,00
-1100	366,80	351,10	342,60	340,60	315,20
-1000	340,60	356,80	336,50	336,50	306,20
-900	291,00	353,50	315,20	308,00	304,50
-800	294,30	338,50	281,50	252,80	275,40
-700	383,50	326,60	313,40	320,80	302,80
-600	435,00	324,60	378,60	378,60	423,30
-500	420,50	262,50	420,50	423,30	383,80
-400	406,40	383,50	373,80	409,40	373,80
-300	399,40	378,60	381,00	396,10	376,20
-200	378,60	371,40	383,50	378,40	381,00
-100	376,20	364,50	376,20	376,20	383,50
0	385,90	378,60	389,10	369,10	385,90
100	381,40	364,50	381,00	371,40	383,10
200	393,50	371,40	393,50	373,50	373,50
300	385,90	376,20	391,00	381,00	376,20
400	401,30	371,40	420,50	406,60	373,80
500	420,50	388,40	396,10	420,50	426,20
600	401,30	308,00	308,00	338,50	404,00
700	328,50	272,40	278,40	320,80	320,80
800	291,00	265,10	334,50	258,20	272,60
900	319,00	309,80	344,70	308,00	330,50
1000	338,50	342,60	346,80	328,50	349,00
1100	355,50	361,00	376,20	357,70	342,60
1200	366,80	369,00	378,60	371,40	357,70
1300	378,40	353,30	376,80	376,20	366,80
1400	378,60	359,00	386,10	375,90	376,20
1500	383,50	366,80	377,70	381,00	378,60
1600	383,50	373,80	364,50	378,60	375,90
1700	376,20	371,00	373,80	381,00	376,20
1800	383,50	388,40	381,00	379,90	383,50
1900	383,50	378,60	388,40	378,40	376,60
2000	385,90	374,70	381,00	383,50	378,40

**EK 3** “4” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "4" Numaralı Numune Termal Analiz

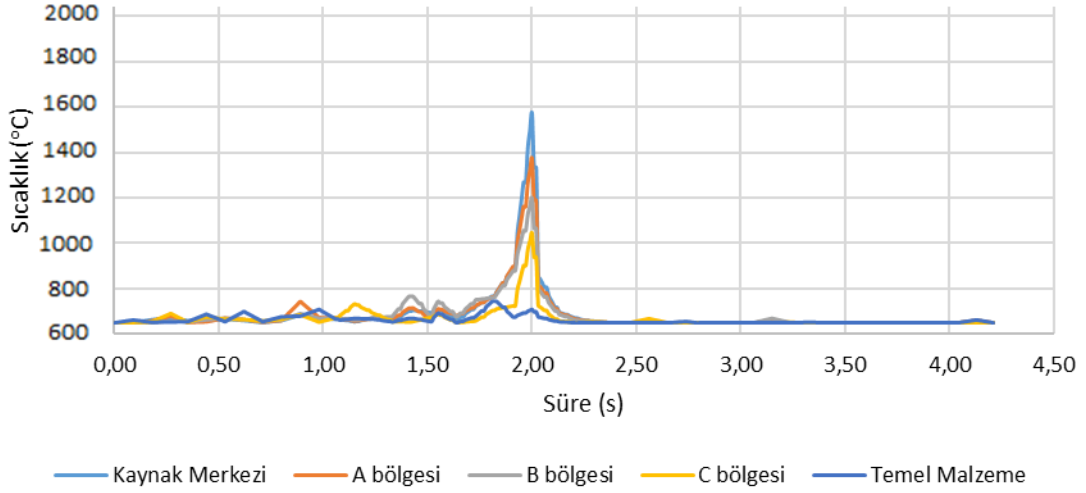


### "4" Numaralı Numune Termal Analiz



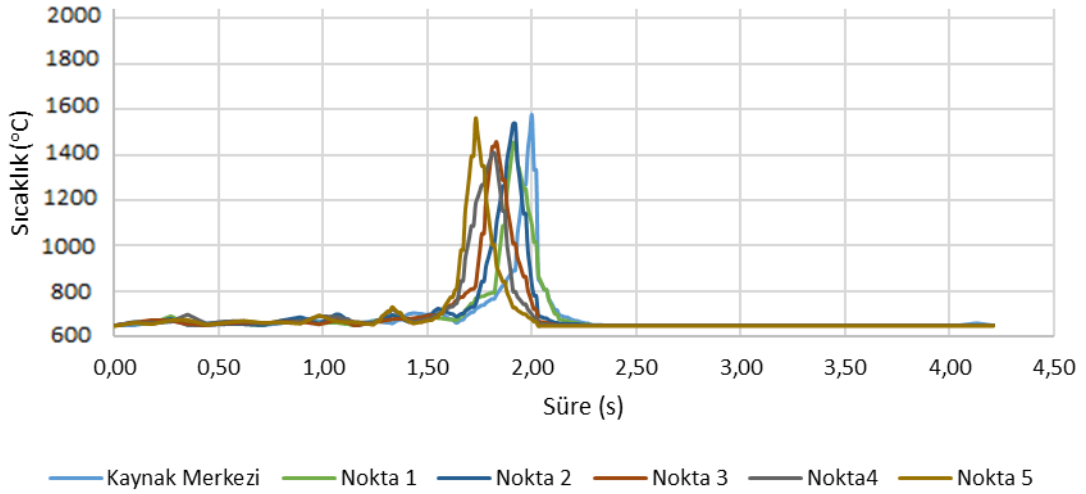
**EK4** “5” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "5" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

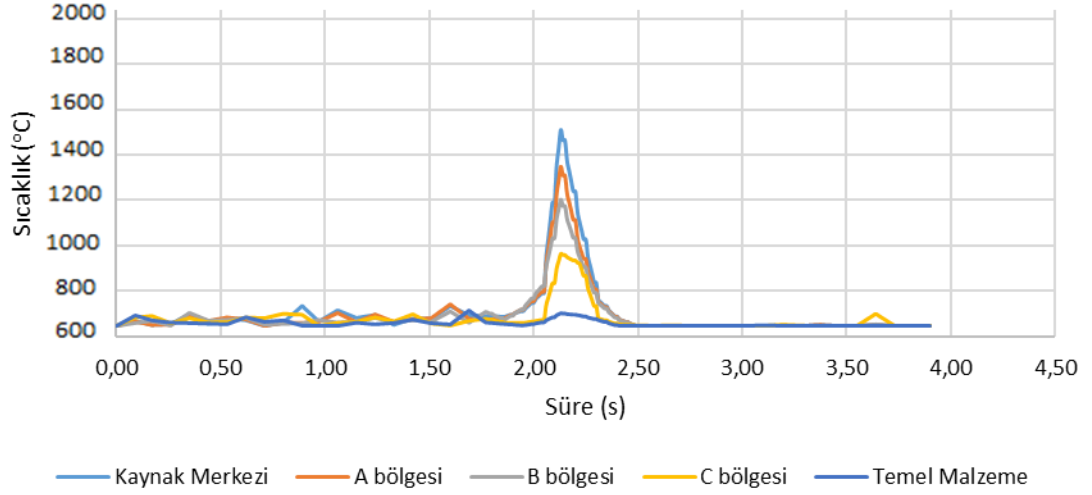
### "5" Numaralı Numune Termal Analiz



b)

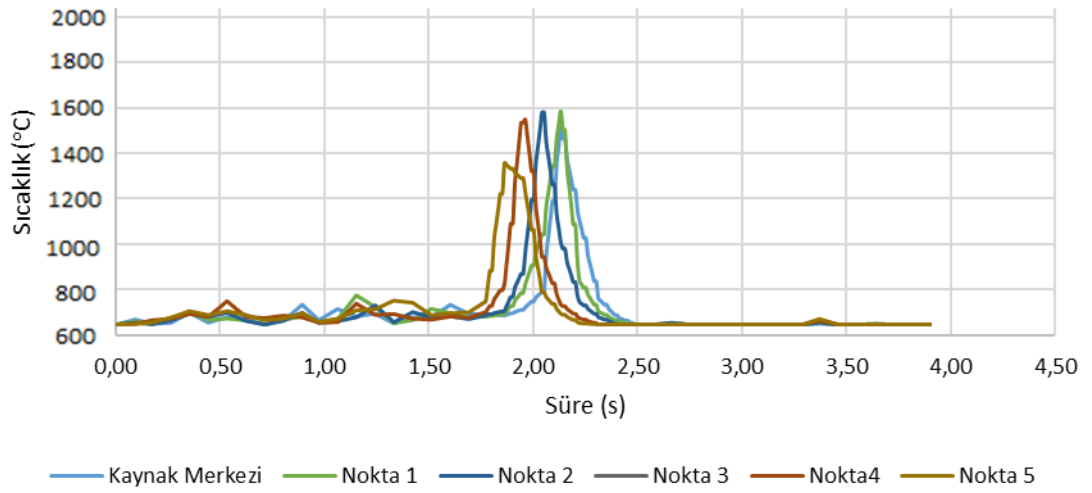
**EK 5** “6” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "6" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

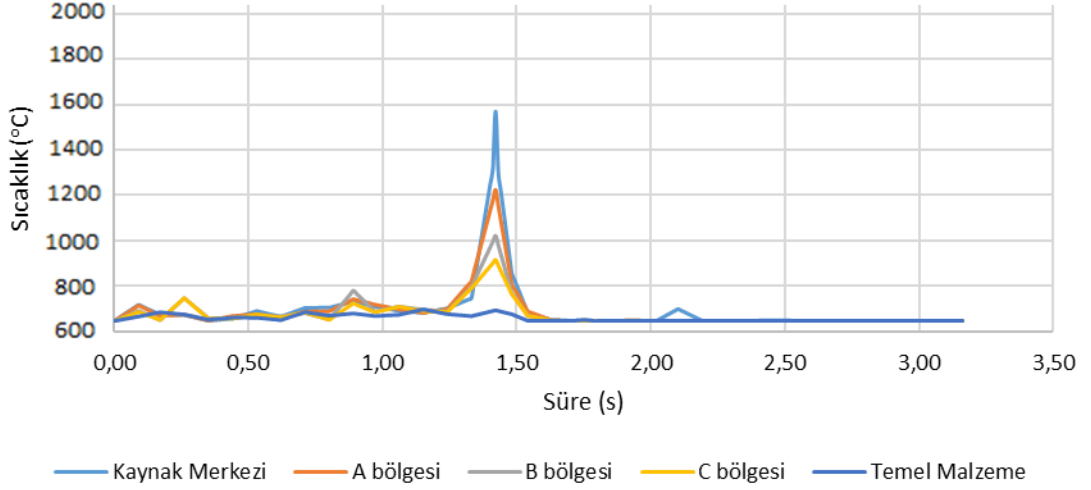
### "6" Numaralı Numune Termal Analiz



b)

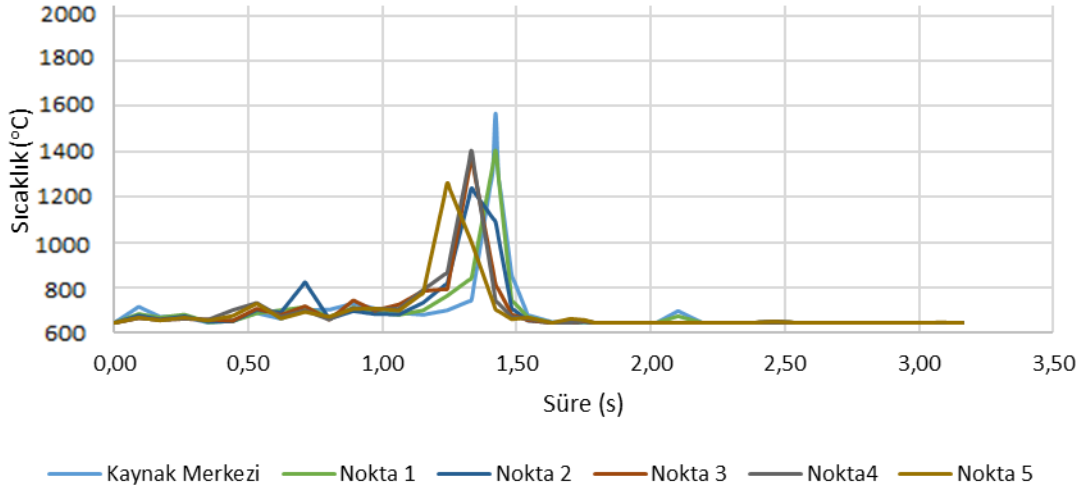
**EK 6** “7” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "7" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

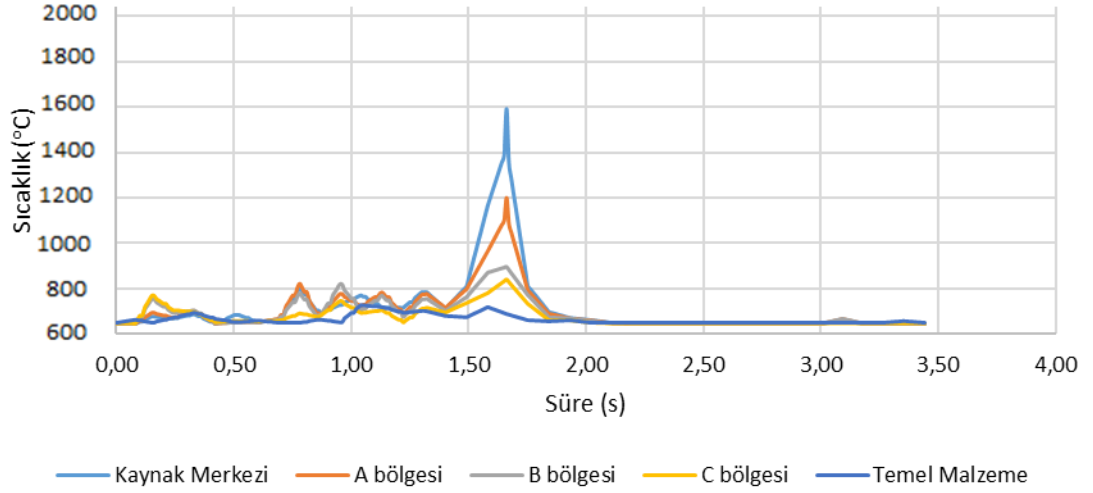
### "7" Numaralı Numune Termal Analiz



b)

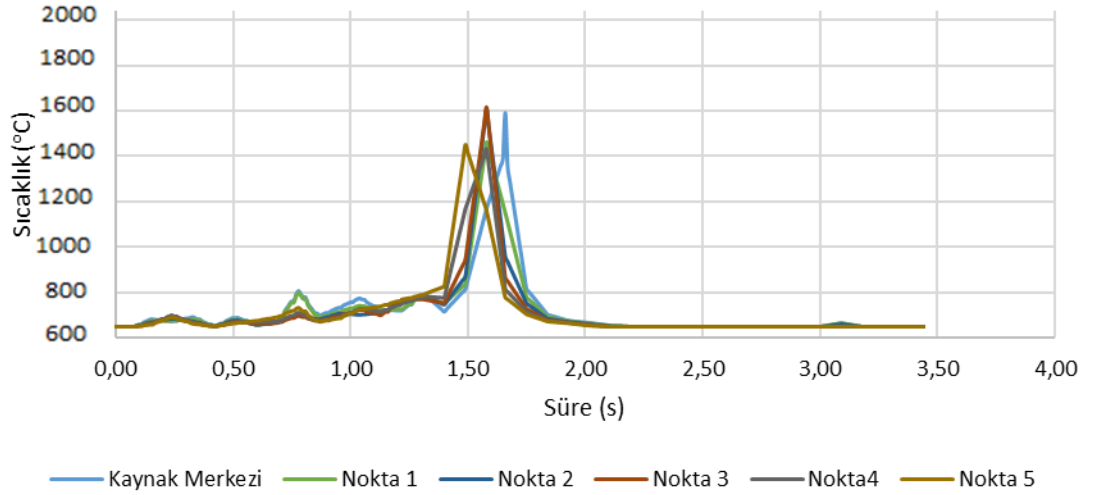
**EK 7** “8” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "8" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

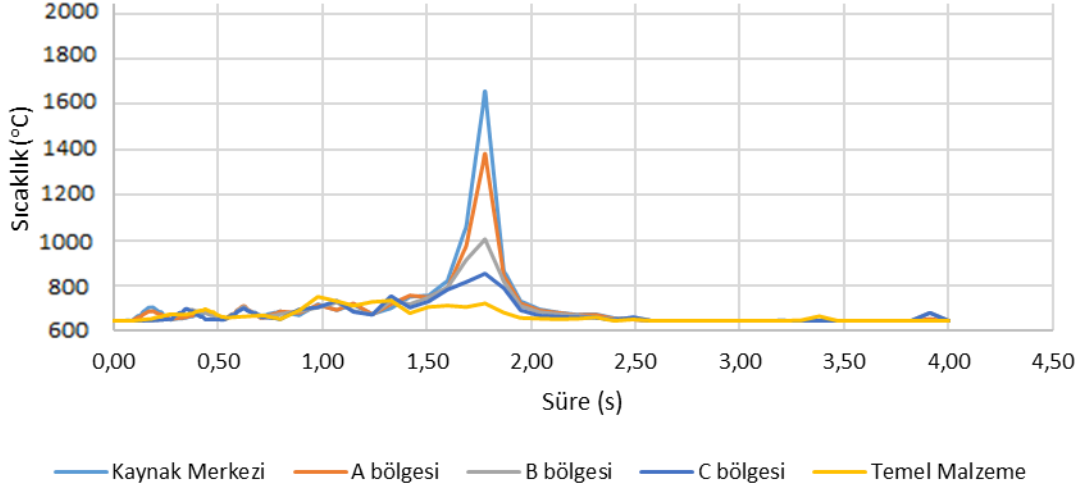
### "8" Numaralı Numune Termal Analiz



b)

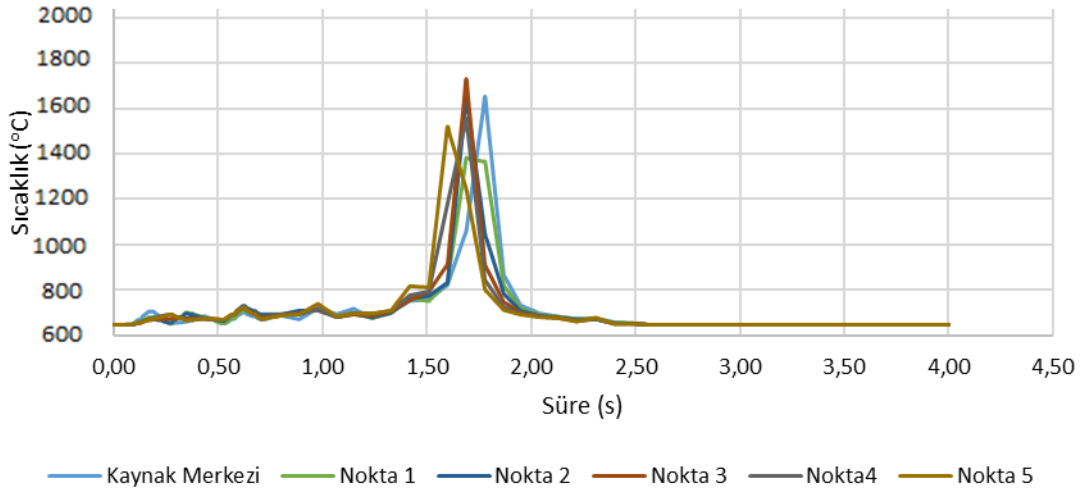
**EK 8** “9” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "9" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

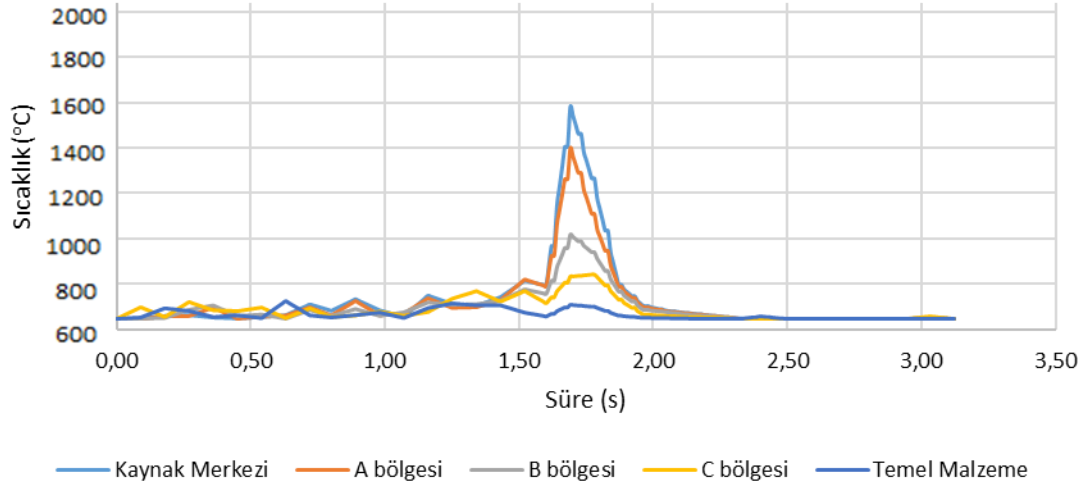
### "9" Numaralı Numune Termal Analiz



b)

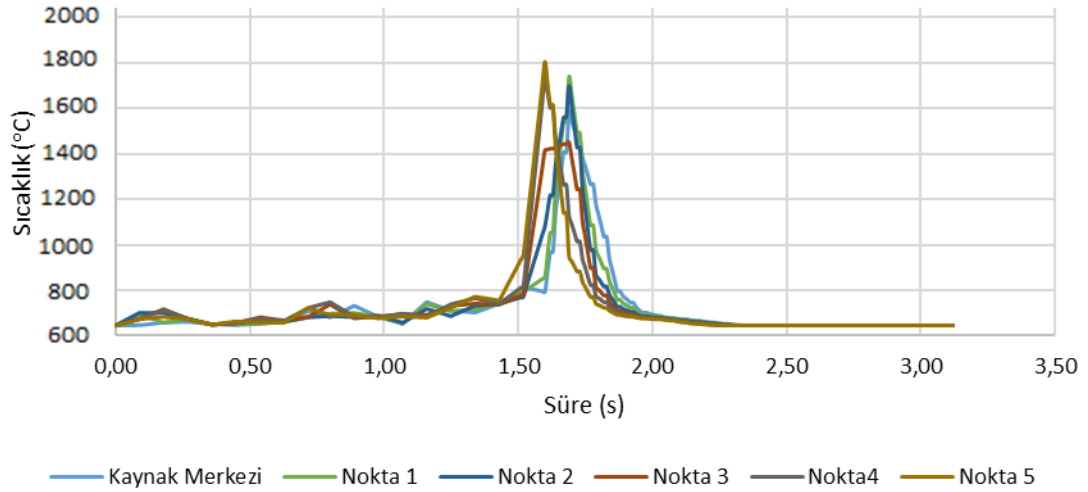
**EK 9** "10" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "10" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

### "10" Numaralı Numune Termal Analiz

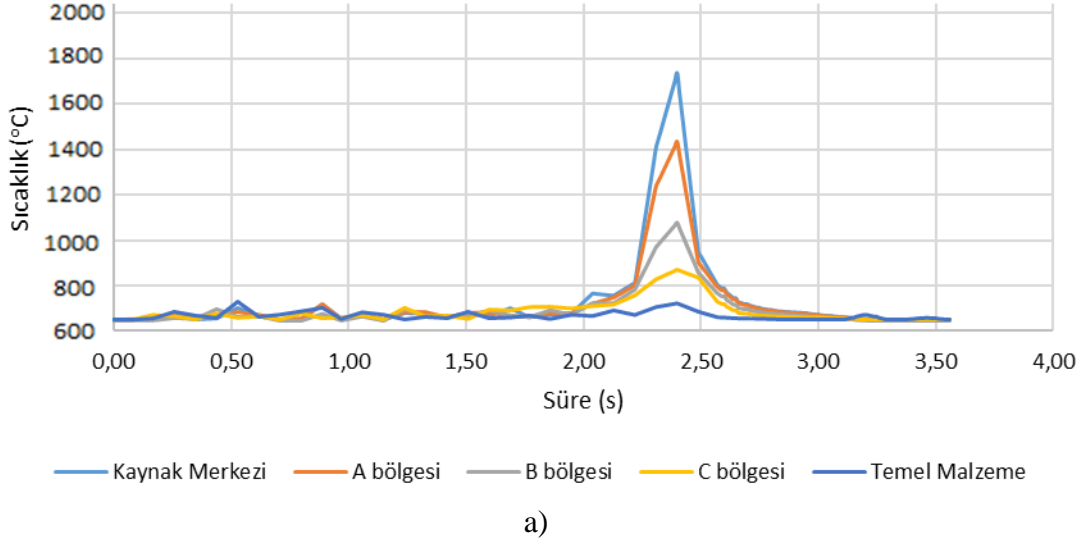


b)

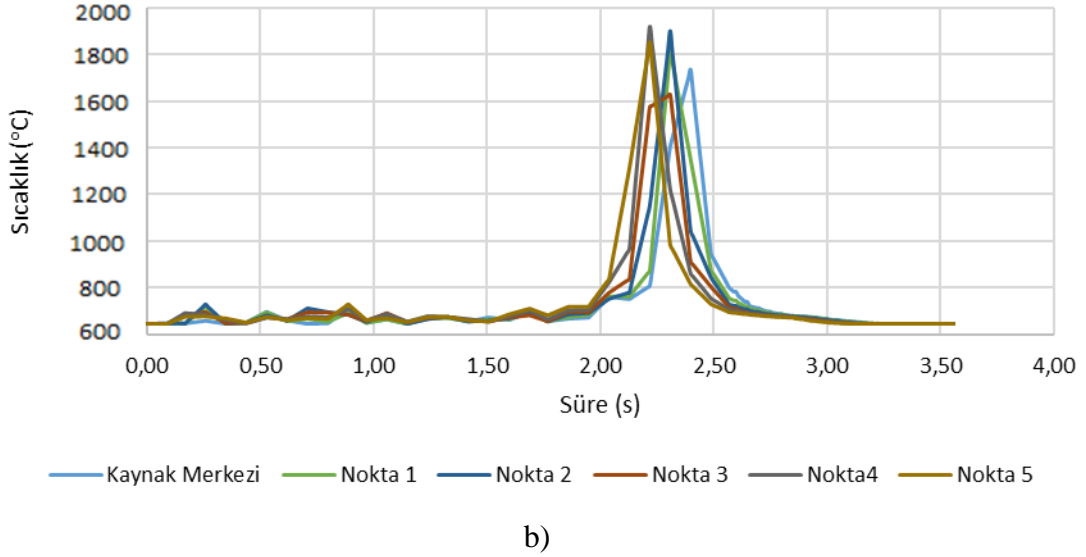


**EK 10** "11" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "11" Numaralı Numune Termal Analiz

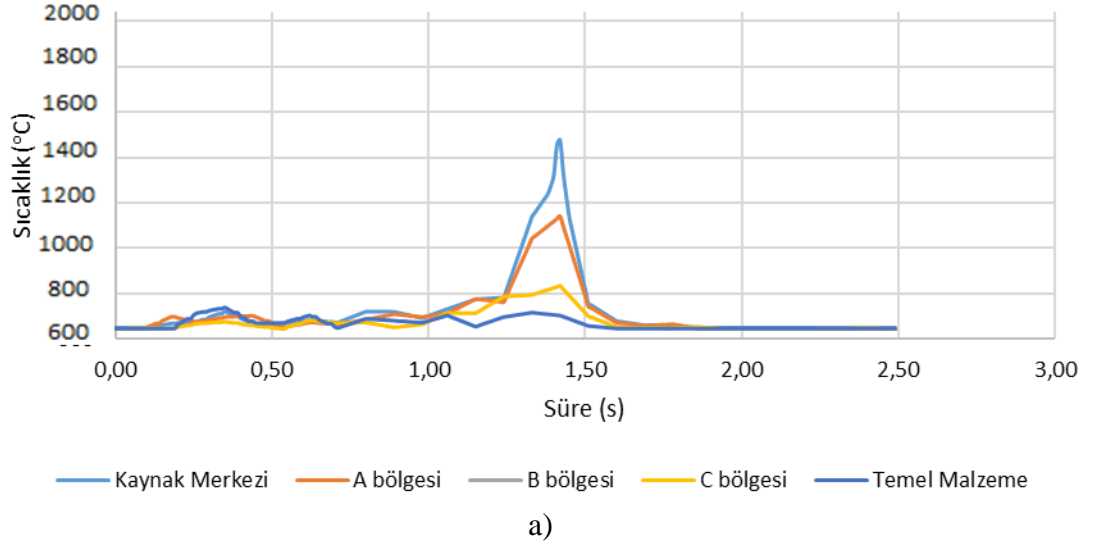


### "11" Numaralı Numune Termal Analiz

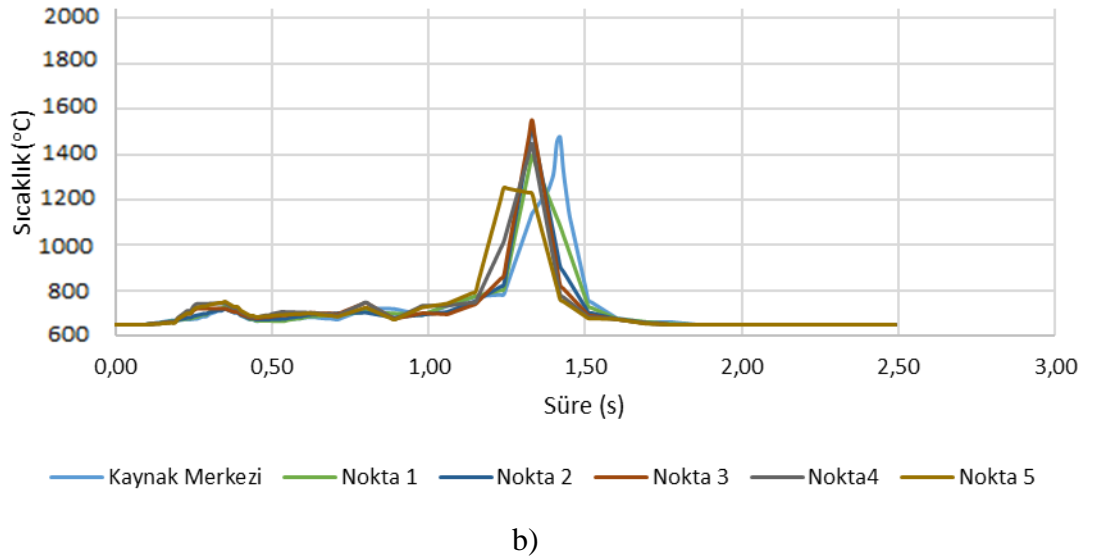


**EK 11** “12” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

"12" Numaralı Numune Termal Analiz

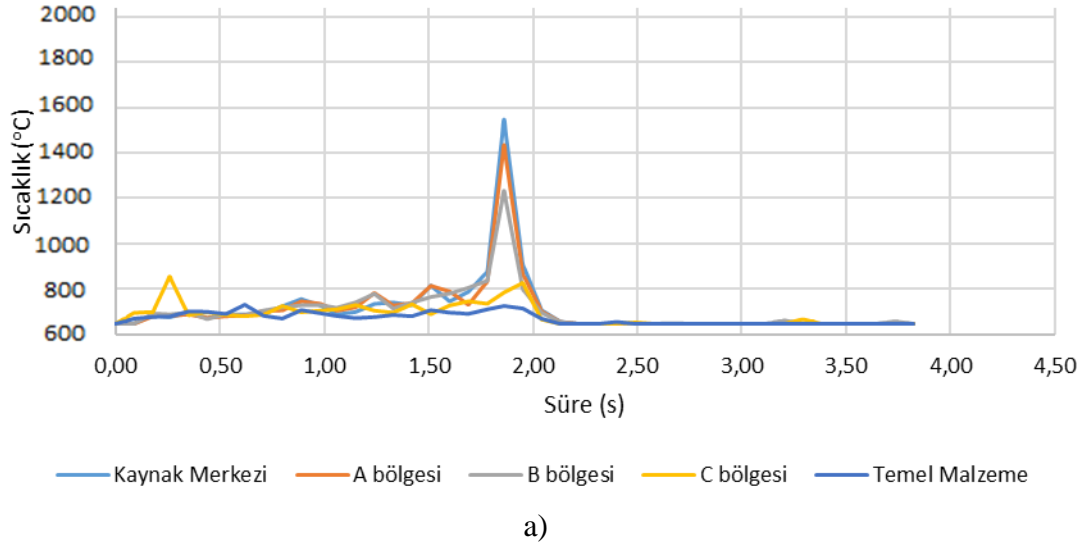


"12" Numaralı Numune Termal Analiz

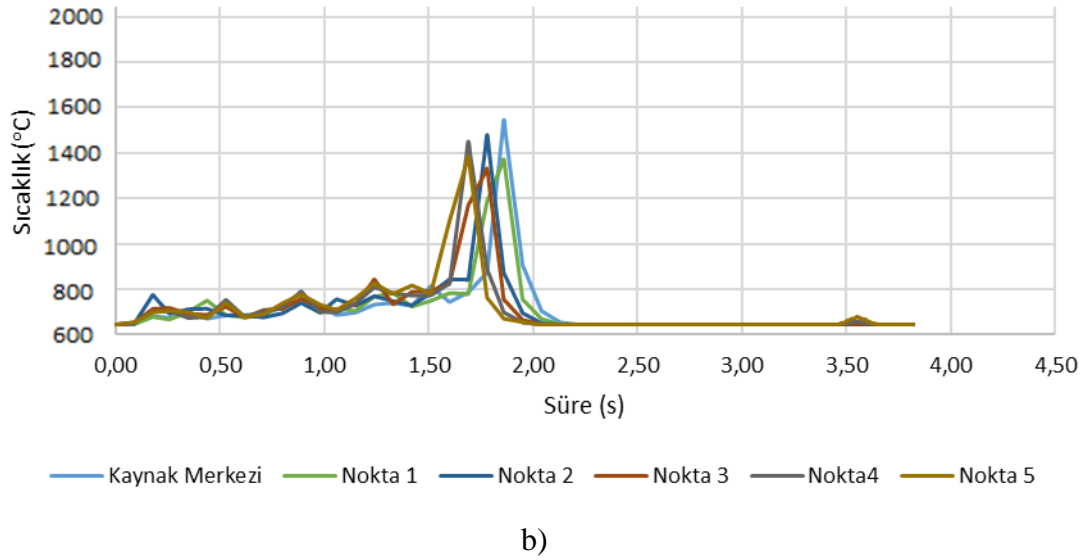


**EK 12** "13" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "13" Numaralı Numune Termal Analiz

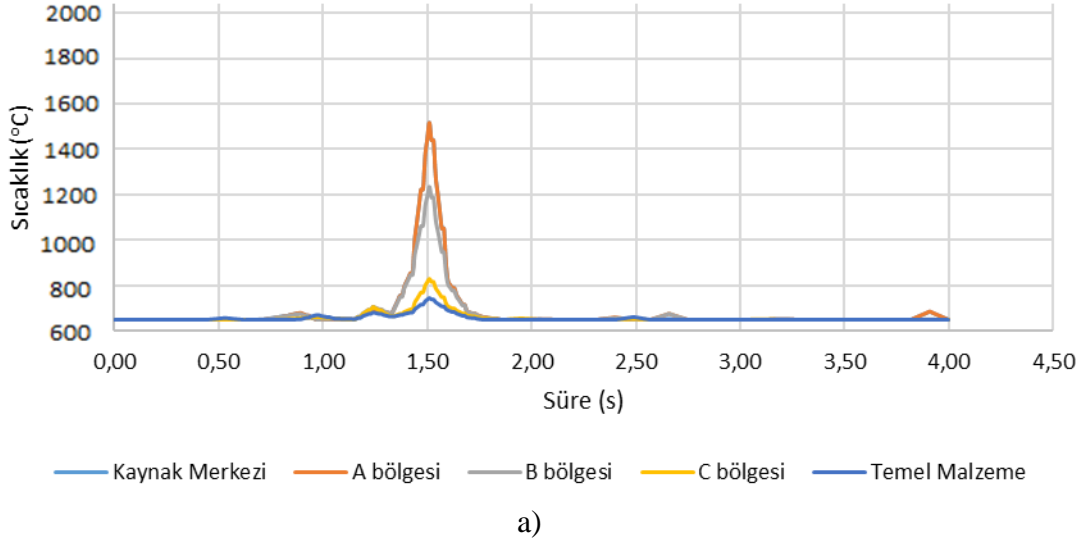


### "13" Numaralı Numune Termal Analiz

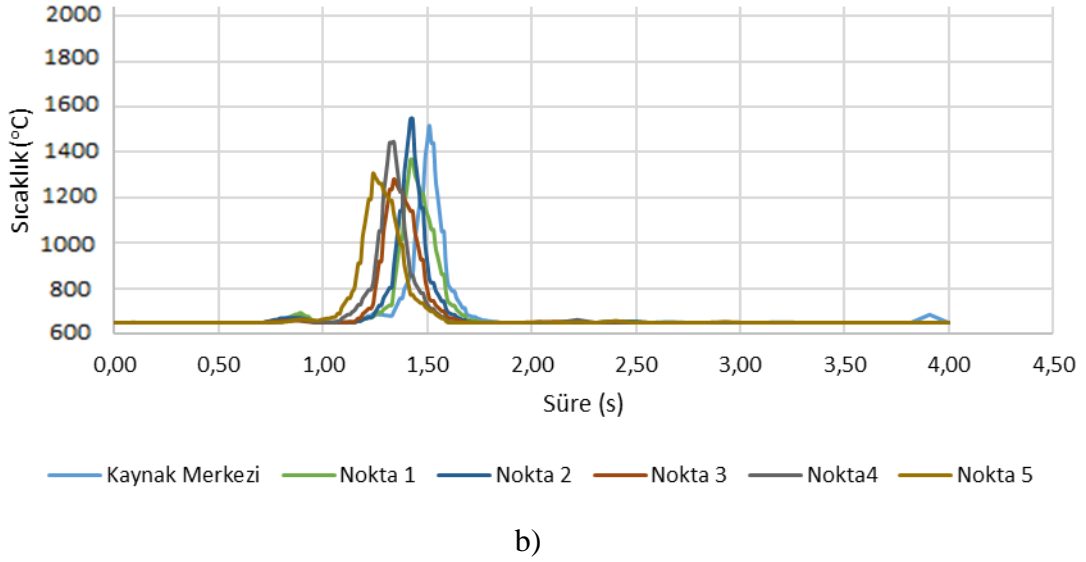


**EK 13** "14" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "14" Numaralı Numune Termal Analiz

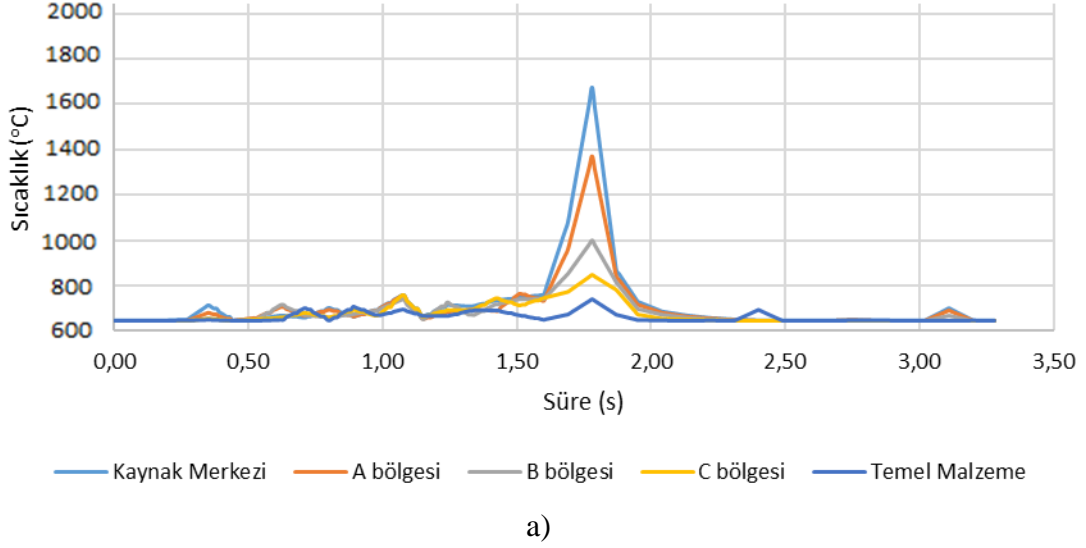


### "14" Numaralı Numune Termal Analiz

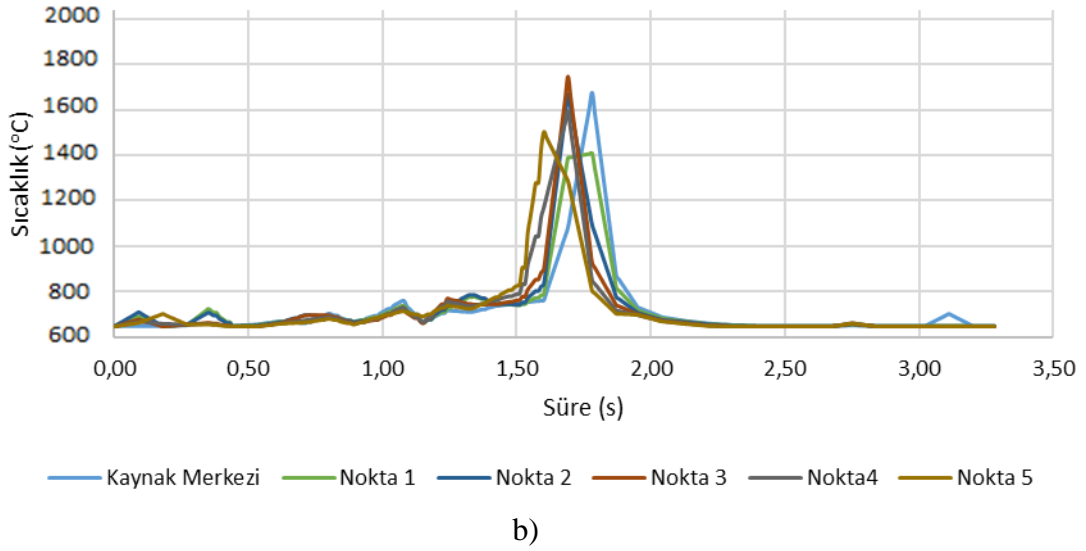


**EK 14** "15" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "15" Numaralı Numune Termal Analiz

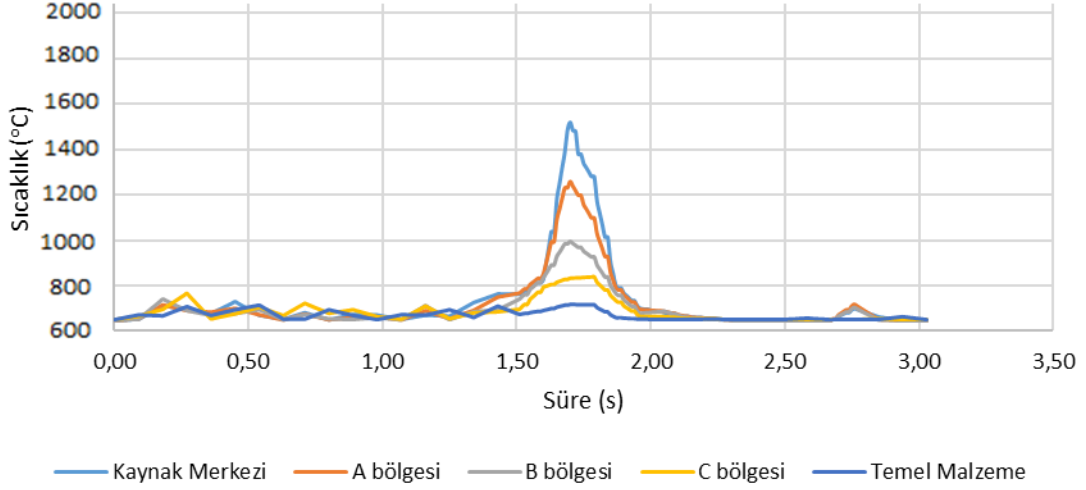


### "15" Numaralı Numune Termal Analiz



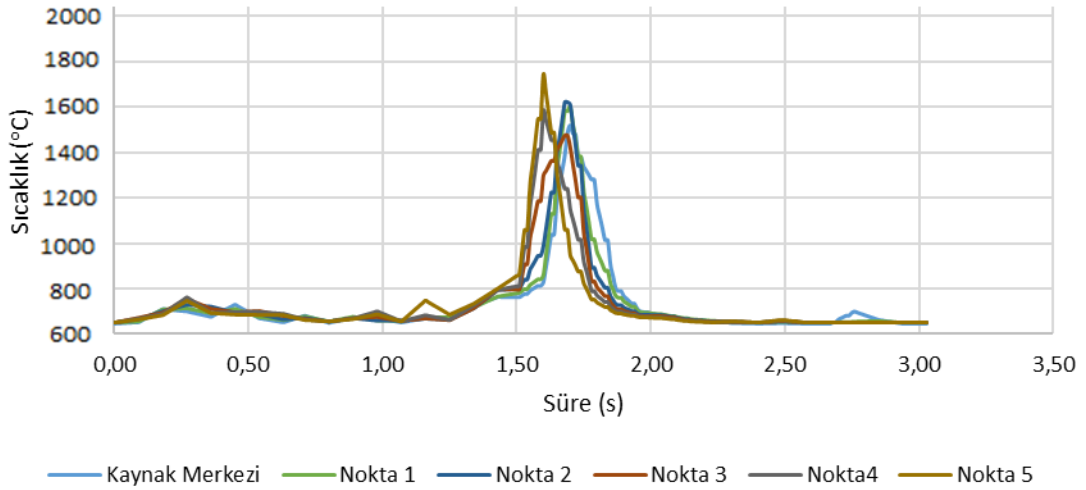
**EK 15** "16" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "16" Numaralı Numune Termal Analiz



a)

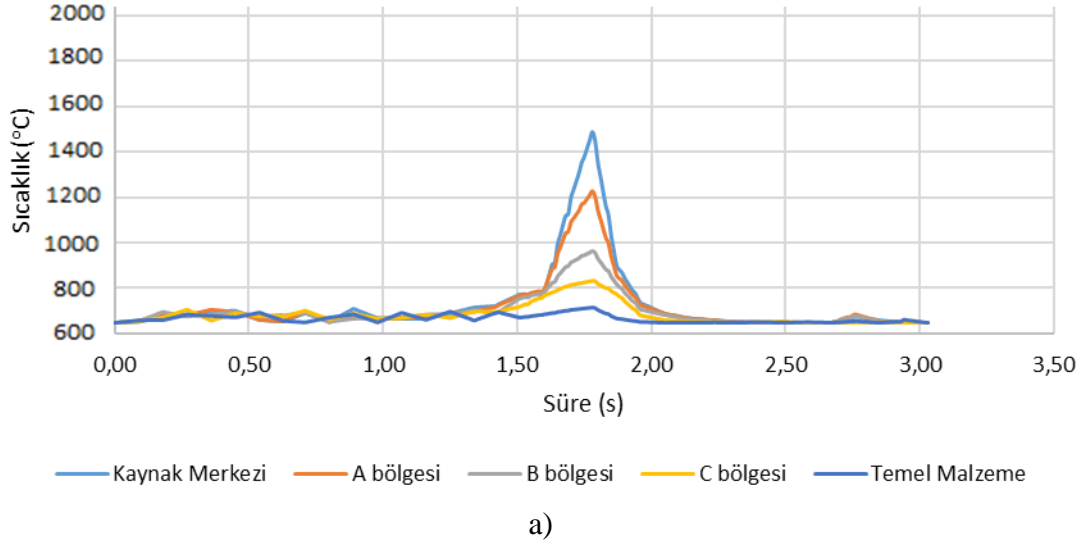
### "16" Numaralı Numune Termal Analiz



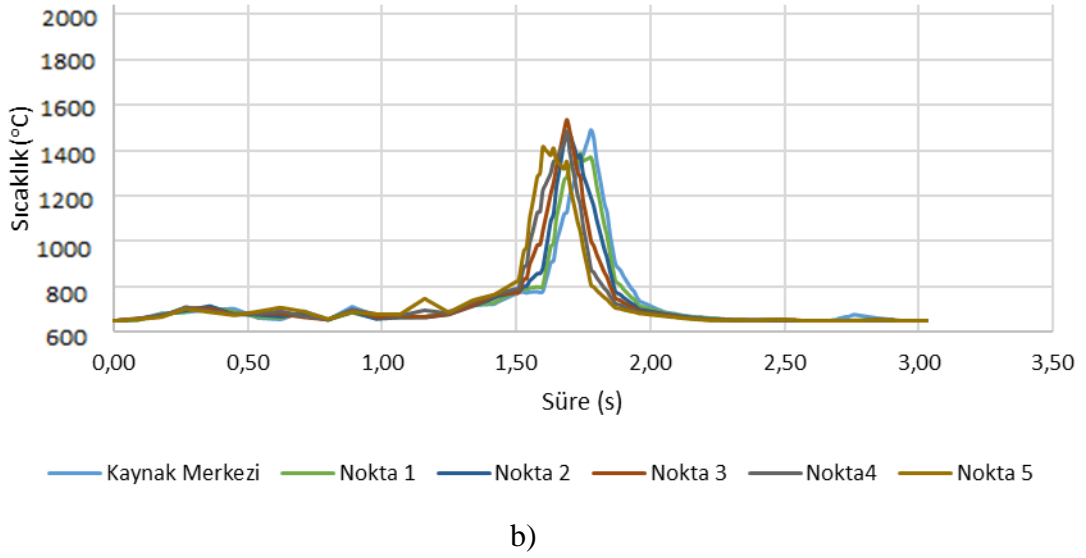
b)

**EK 16** "17" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "17" Numaralı Numune Termal Analiz

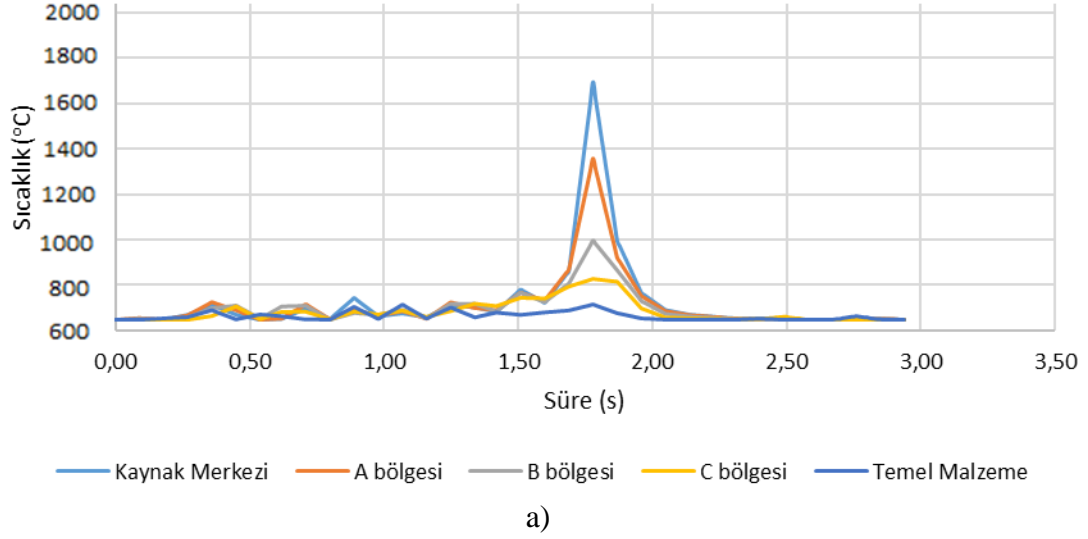


### "17" Numaralı Numune Termal Analiz

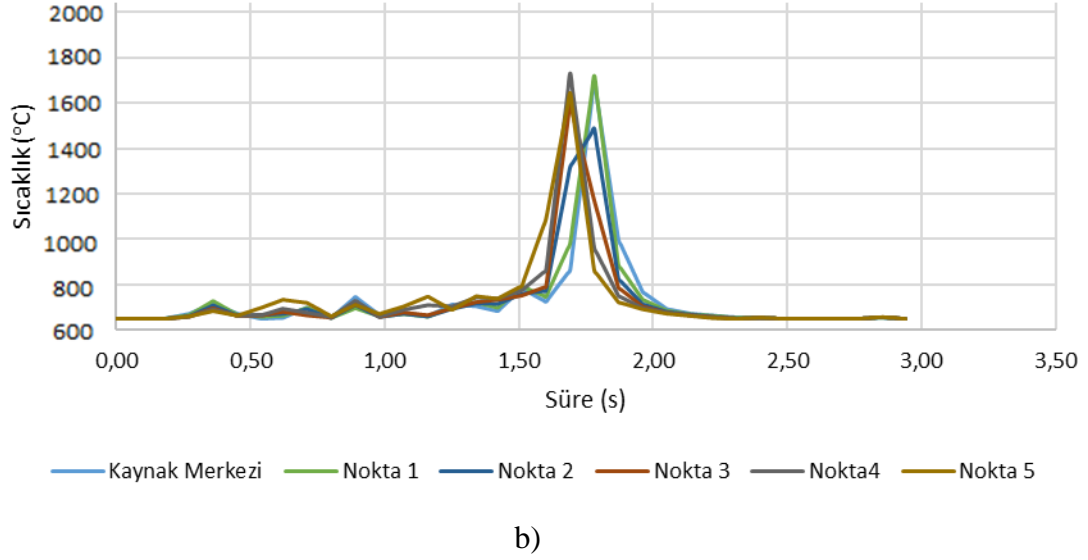


**EK 17** “18” numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "18" Numaralı Numune Termal Analiz



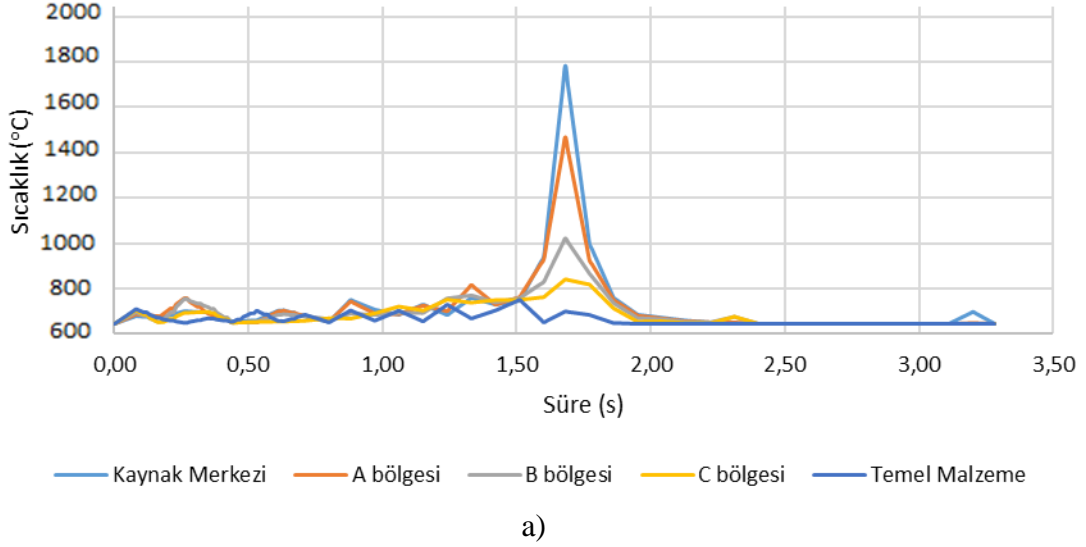
### "18" Numaralı Numune Termal Analiz



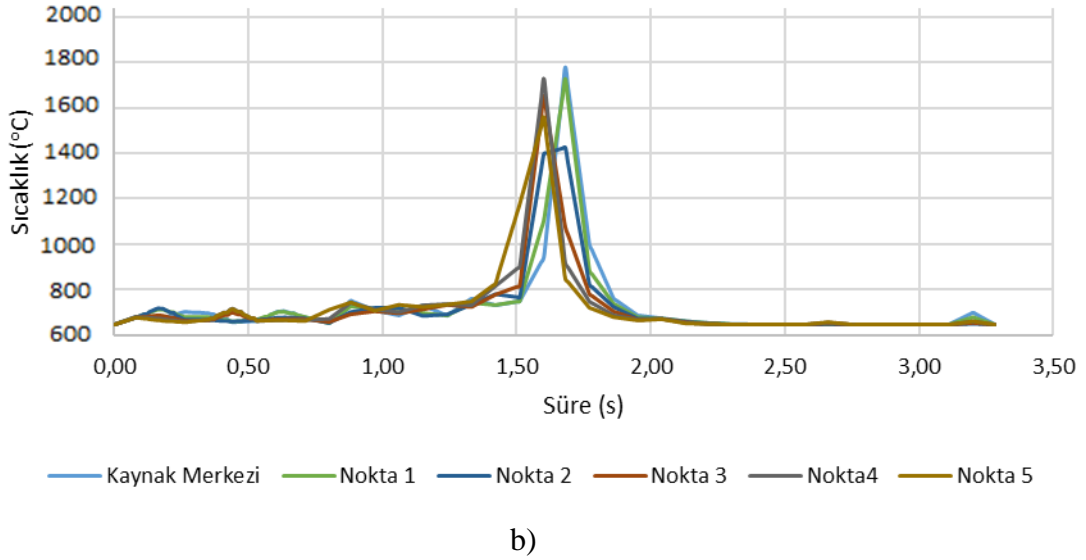


**EK 18** "19" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

### "19" Numaralı Numune Termal Analiz

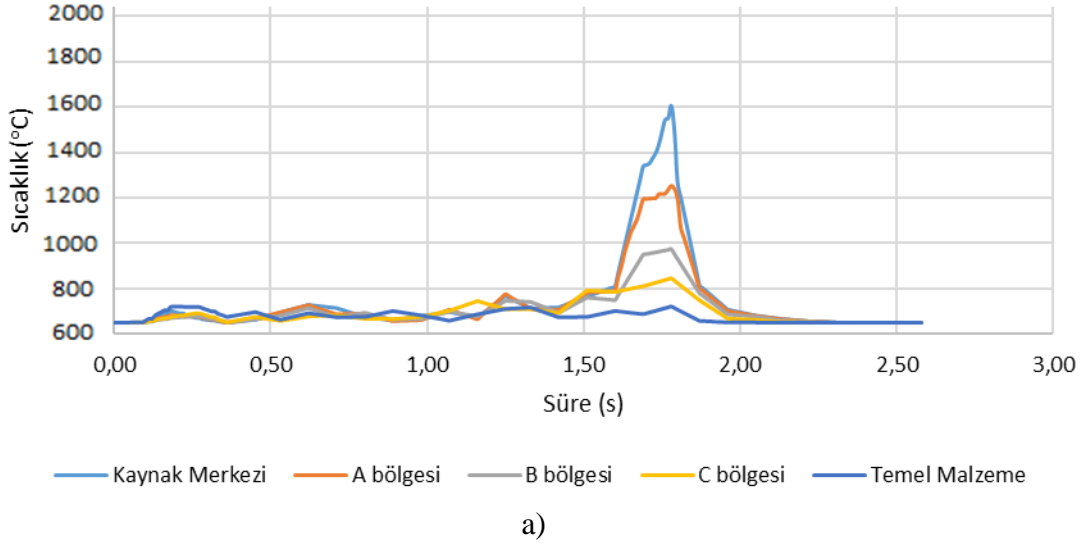


### "19" Numaralı Numune Termal Analiz

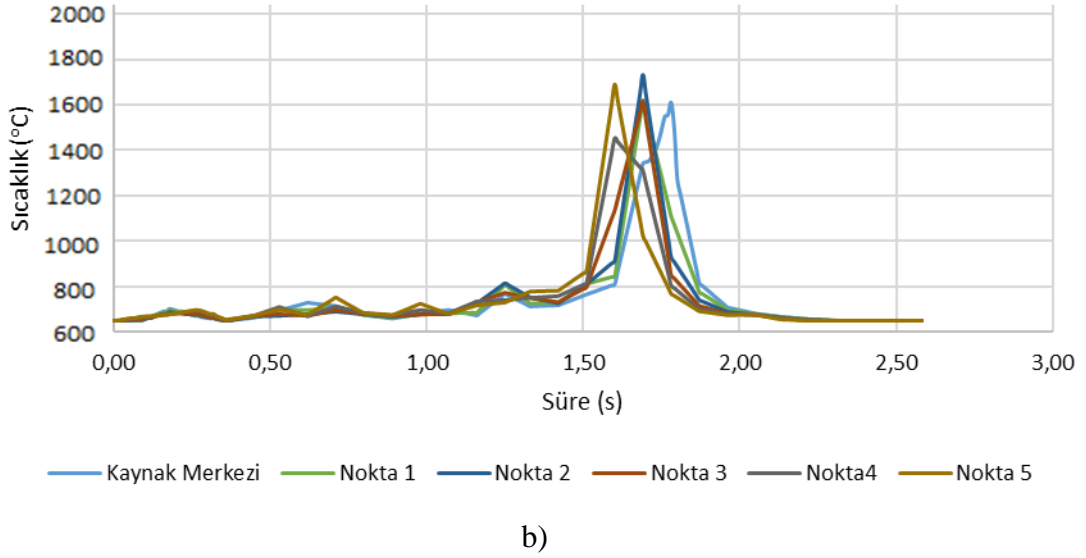


**EK 19** "20" numaralı numunenin belirlenen noktalar için termal çevrim grafikleri a) kaynak merkezi, A bölgesi, B bölgesi, C bölgesi, temel malzeme noktaları b) kaynak merkezi, Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5

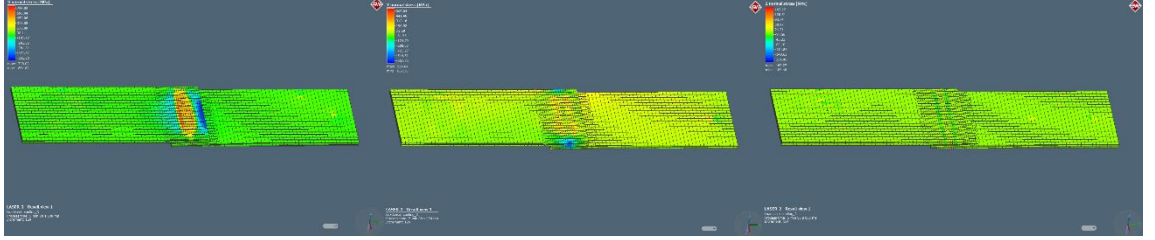
### "20" Numaralı Numune Termal Analiz



### "20" Numaralı Numune Termal Analiz



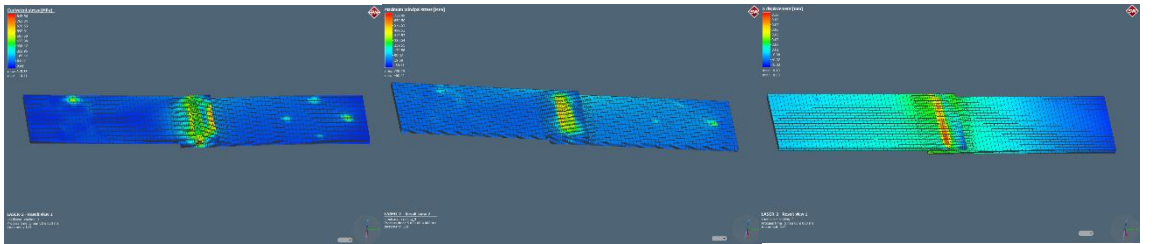
**EK 20** “2” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

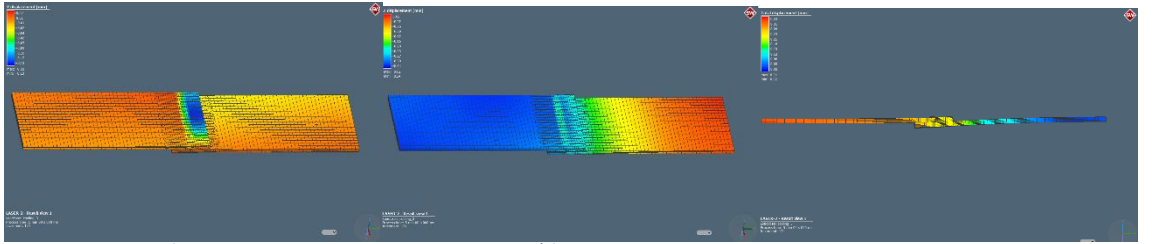
c)



d)

e)

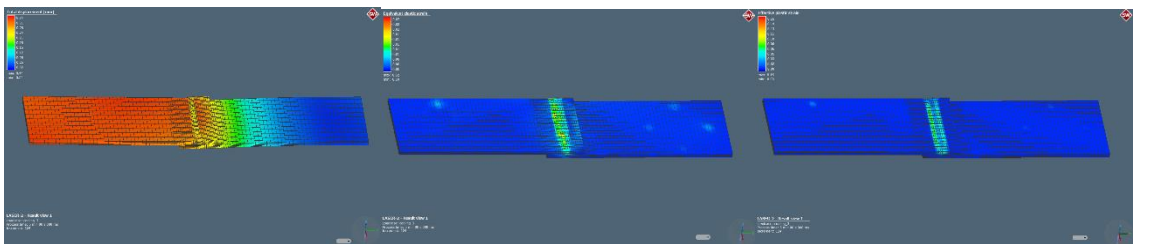
f)



g)

h)

i)

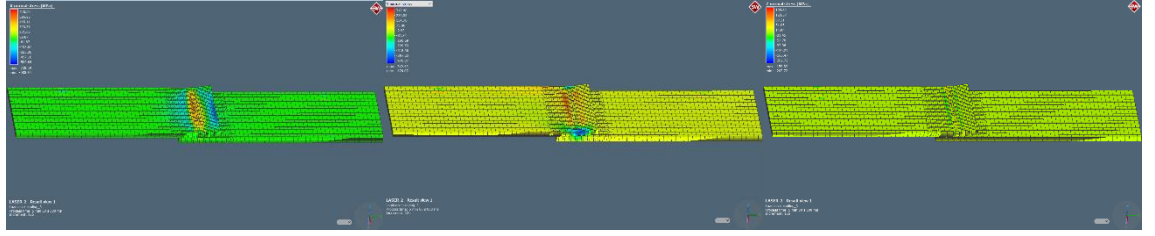


j)

k)

l)

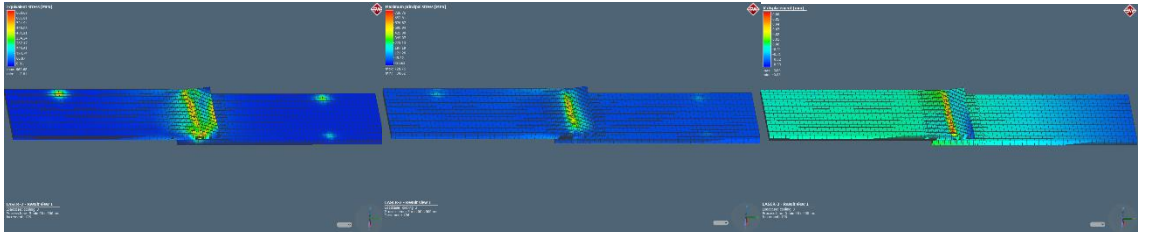
**EK 21** “3” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman, j) elastik şekil değiştirme, j) plastik şekil değiştirme



a)

b)

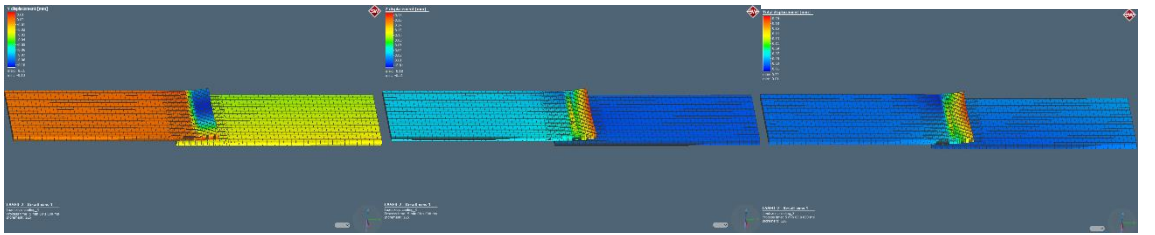
c)



d)

e)

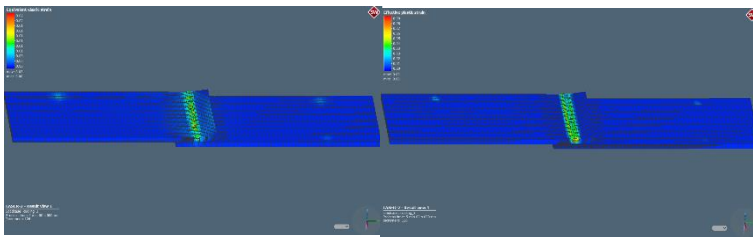
f)



g)

h)

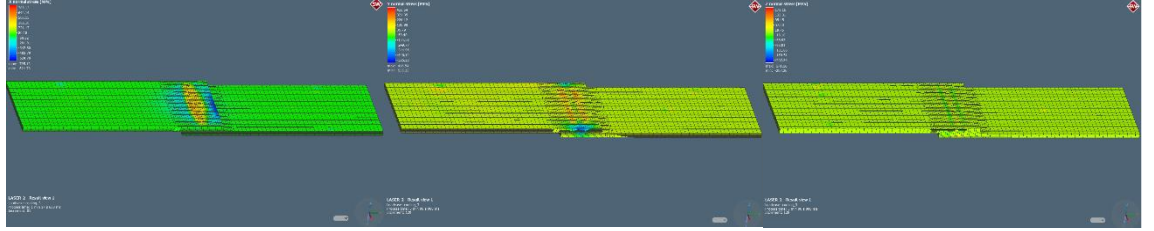
i)



j)

k)

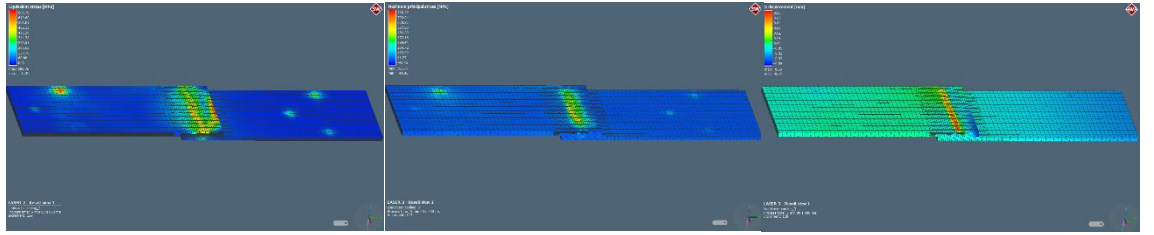
**EK 22** “4” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

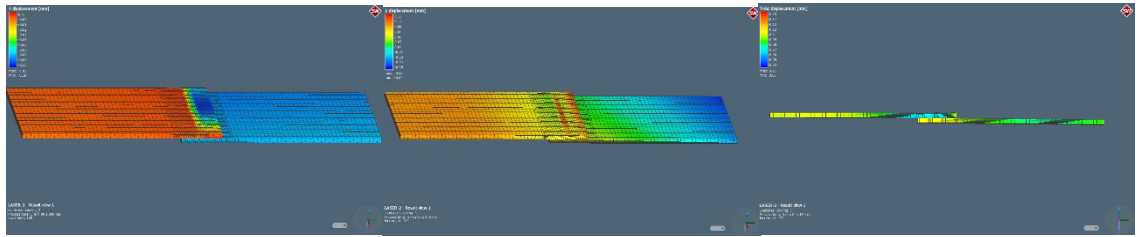
c)



d)

e)

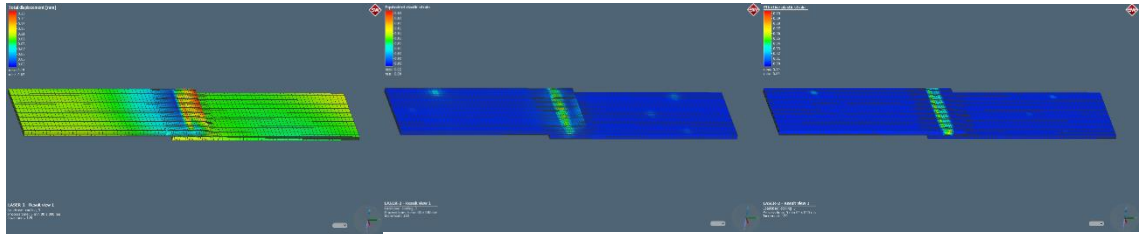
f)



g)

h)

i)

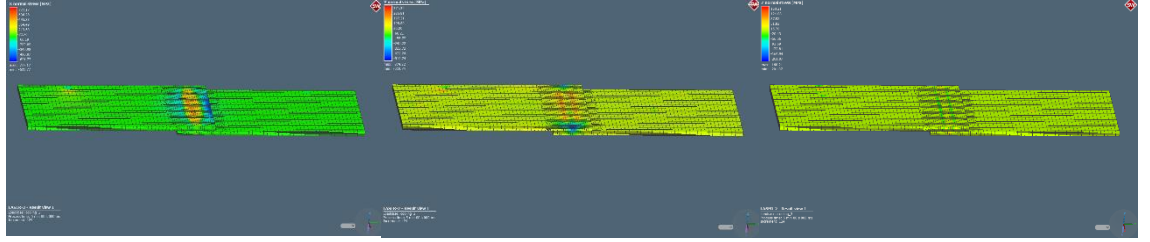


j)

k)

l)

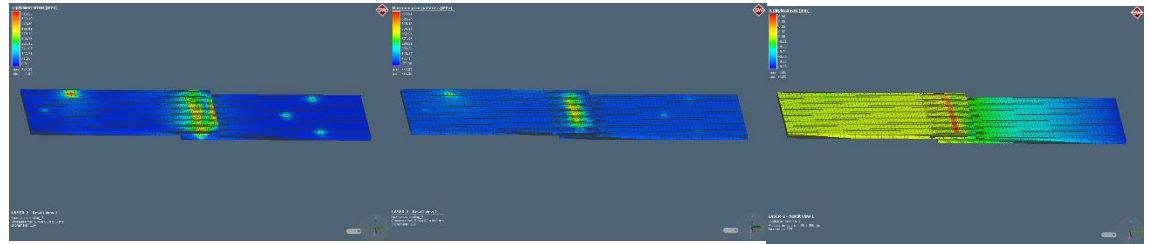
**EK 23** “8” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

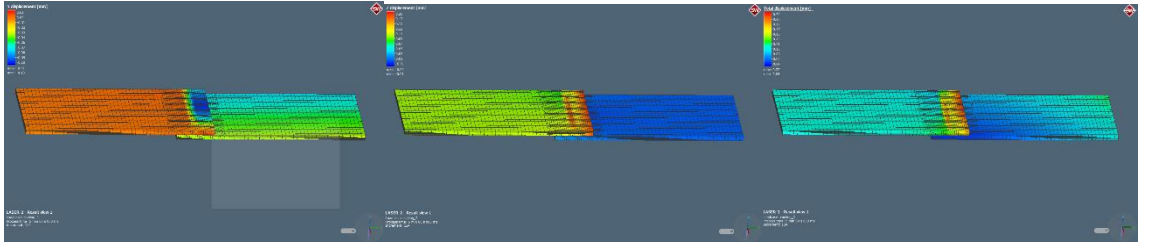
c)



d)

e)

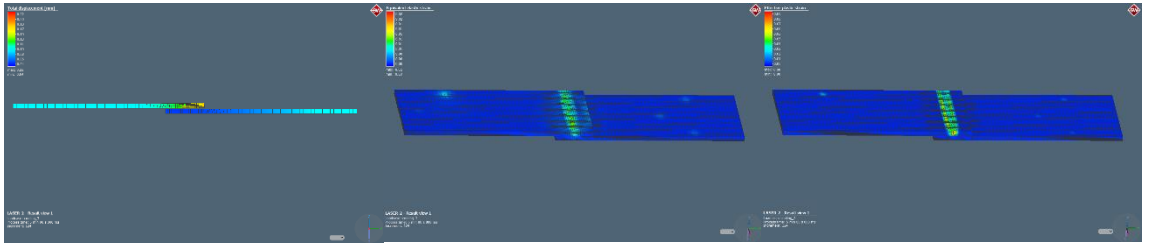
f)



g)

h)

i)

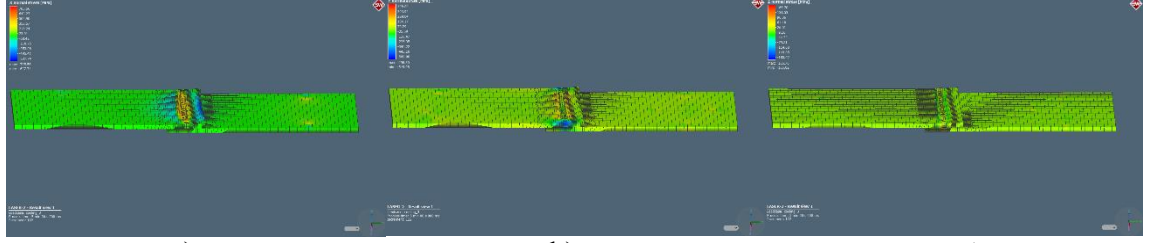


j)

k)

l)

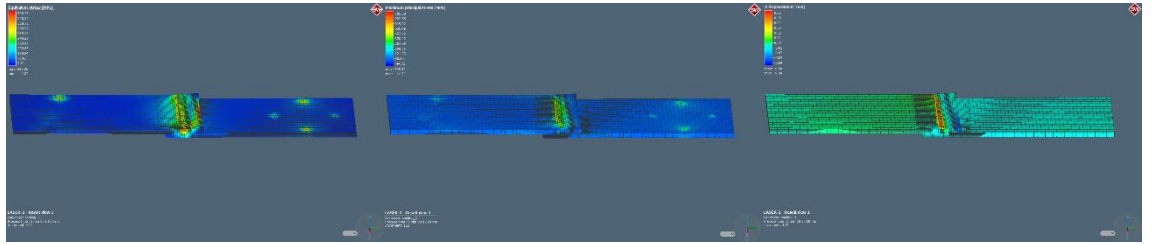
**EK 24** “13” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

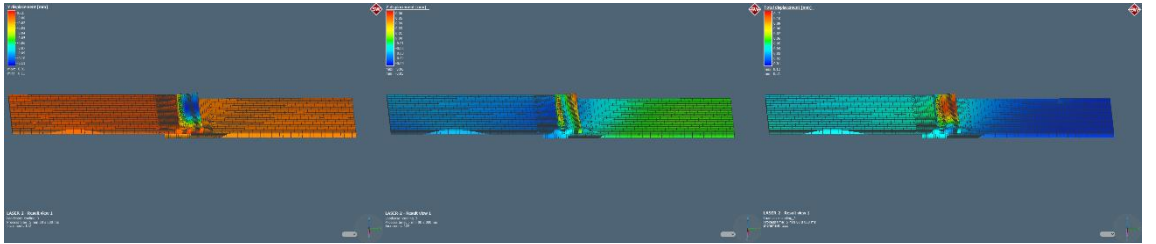
c)



d)

e)

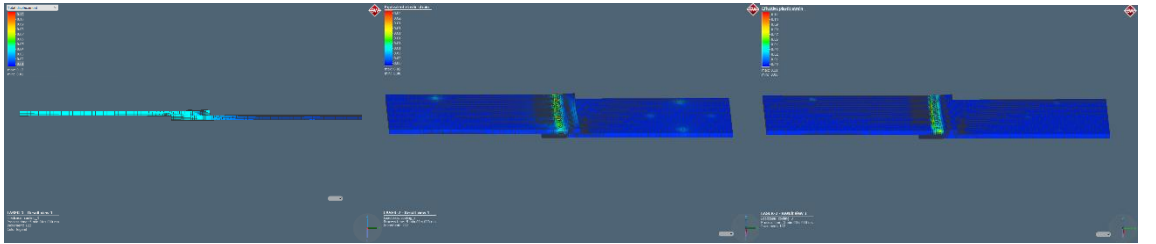
f)



g)

h)

i)

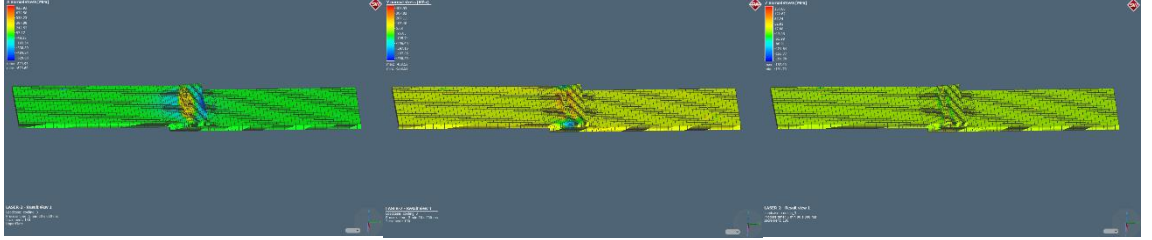


j)

k)

l)

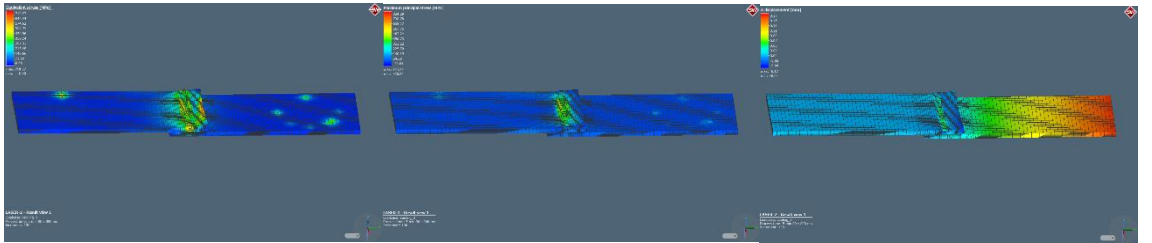
**EK 25** “14” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

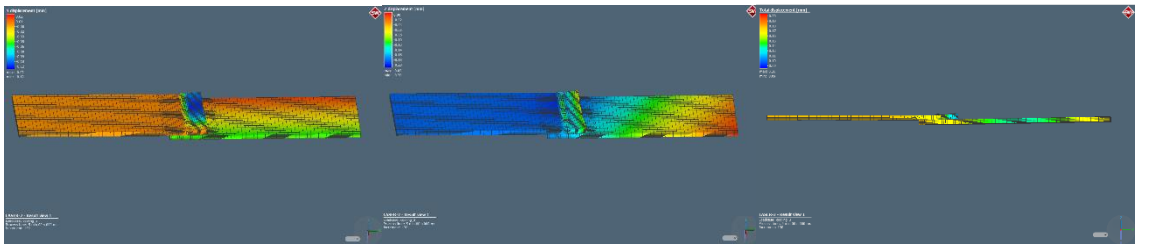
c)



d)

e)

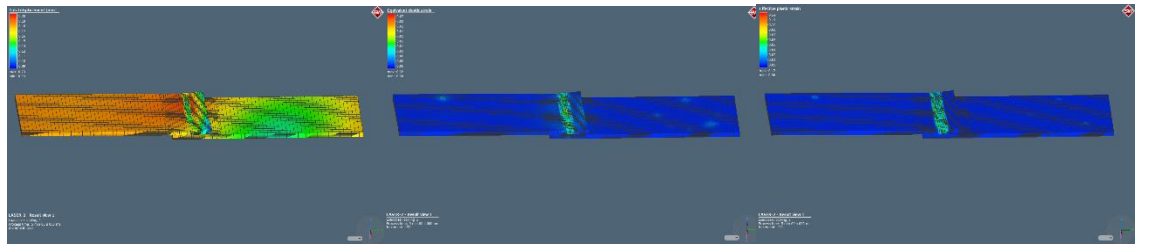
f)



g)

h)

i)



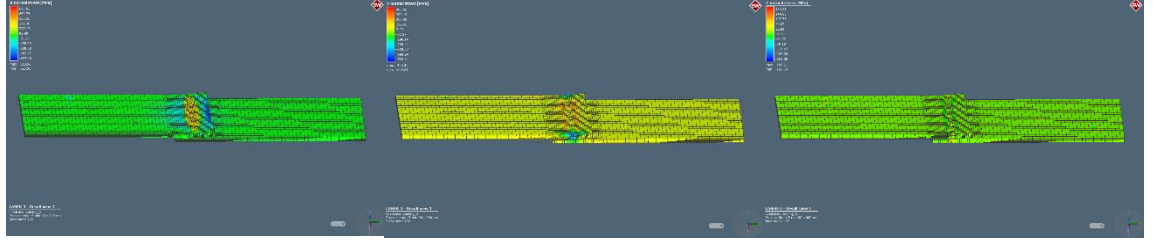
j)

k)

l)



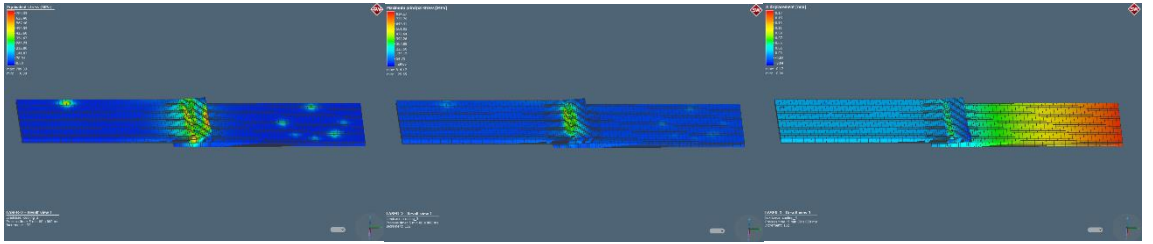
**EK 26** “15” numaralı numune a) X doğrultusunda normal gerilme, b) Y doğrultusunda normal gerilme, c) Z doğrultusunda normal gerilme, d) eşdeğer gerilme, e) maksimum asal gerilme, f) X doğrultusunda deplasman, g) Y doğrultusunda deplasman, h) Z doğrultusunda deplasman, i) toplam deplasman yan görünüş, j) toplam deplasman ön görünüş, k) elastik şekil değiştirme, l) plastik şekil değiştirme



a)

b)

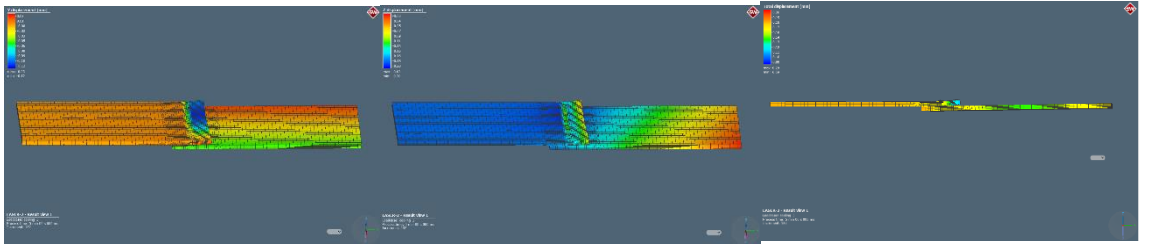
c)



d)

e)

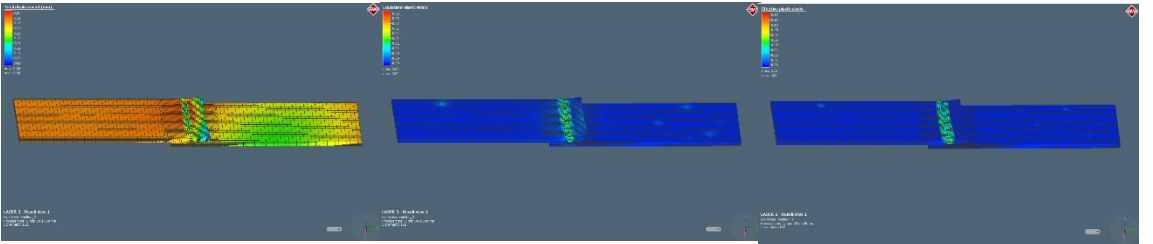
f)



g)

h)

i)



j)

k)

l)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Meryem ALTAY  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 18.04.1994  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Bursa Anadolu Erkek Lisesi (2012)  
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü (2017)  
Endüstri Mühendisliği Bölümü (2017)  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2021)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

Akwel Bursa Turkey Otomotiv A. Ş. Proses Mühendisi (2019)  
Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,  
Araştırma Görevlisi (2020-...)

İletişim (e-posta) : meryemaltay@uludag.edu.tr

### Yayımları :

Altay, M., Aydın, H. 2021. Optimization of Overlap Laser Welding Process Parameters in DP1200 Sheet Steel Used in Automotive Industry. 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2020, 762–768.  
Dindar, Ç., Altay, M., Aydın, H. 2021. Lazer Kaplama Prosesi ve Proses Parametreleri: Derleme Çalışması. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 26 (2)(574):, 723–736. <https://doi.org/10.17482/uumfd.798666>  
Dindar, Ç., Altay, M., Tutar, M., Aydın, H. 2020. The Effect of Infill Pattern on Mechanical Properties of Materials Produced by Fused Deposition Modeling. International Marmara Sciences Congress IMASCON 2020 – Autumn, 464–470.  
Kara, B., Kurtuluş, E., Zeybek, A., Altay, M., Aydın, H. 2021. Understanding Deformation Behavior of AM50 and AZ31 Magnesium Extrusions with Various Heat Treatments in Comparison with AA6063 and AA6082 Aluminum Extrusions. Proceedings of the 12th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications, The Minerals, Metals & Materials Series, 157-166. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72432-0_16)